

UNIVERSIDAD CARLOS III DE MADRID
Escuela Politécnica Superior

MONTAJE, CARACTERIZACIÓN Y MODELADO DE UNA COCINA SOLAR SEMIPARABÓLICA

Tutor: Ulpiano Ruiz Rivas
Autor: Jorge Gostanza Fernández
- Ingeniería Industrial, especialidad Tecnologías Energéticas -

Contenido

1. RESUMEN	3
2. INTRODUCCIÓN	4
2.1. El Sol	4
2.2. Radiación Solar.....	5
2.2.1. Radiación extraterrestre y radiación en superficie	5
2.2.2. Declinación	6
2.2.3. Ángulo horario	7
2.2.4. Altura solar, ángulo cenital y ángulo azimutal.....	7
2.3. Reflexión y absorción	9
2.4. Radiación en función de la longitud de onda.....	10
2.5. Concentrador semiparabólico.....	11
2.6. Sistemas Solares	13
2.7. Cocinas Solares.....	14
2.7.1. Deforestación	14
2.7.2. Cocinas solares.....	16
2.8. Cocina PRIMROSE	18
3. MONTAJE, INSTALACIÓN Y TEORÍA DE LA CARACTERIZACIÓN	20
3.1. Medidas de la Cocina PRIMROSE	22
3.2. Medidas del Concentrador Semiparabólico	23
3.3. Técnicas de medida	26
3.3.1. Medida del ángulo de rotación del panel	26
3.3.2. Cálculo de la hora solar	27
3.3.3. Visualización directa del foco.....	27
3.4. Tratamiento de imágenes con <i>Matlab</i>	30
3.4.1. Imagen como nivel de grises	30
3.4.2. Error de percepción de luminosidad de la cámara.....	31
3.4.3. Método del valor umbral.....	33
4. RESULTADOS DE LA CARACTERIZACIÓN.	34
4.1. Formación del foco del concentrador semiparabólico	34
4.1.1 Importancia de las zonas del concentrador en la formación del foco. ..	34
4.1.2. Localización de zonas Xa, X2, X2 y Xb mediante tratamiento de imágenes.....	38
4.2. Efecto sobre el foco del ángulo α (ángulo de rotación del concentrador.) .	50
4.3. Efecto sobre el foco del ángulo θ (Altura Solar).....	57
4.4. Calentamiento de agua en función de la posición del foco.....	65
5. CONCLUSIONES Y TRABAJOS FUTUROS.....	70
BIBLIOGRAFÍA	71

1. RESUMEN

El objetivo sobre el que se desarrolla este proyecto es el de la caracterización de la cocina con concentrador semiparabólico denominada comercialmente PRIMROSE, para llegar a conocer el comportamiento del foco que refleja el espejo de la cocina y de las variables que influyen en la posición del foco, teniendo disponible un primer análisis del funcionamiento de la cocina para futuras caracterizaciones térmicas, ópticas o de otro tipo, conociendo las zonas más importantes de la proyección del foco como es su comportamiento respecto a las diferentes variables y cual es su posición óptima.

Para llegar a desarrollar el estudio, se comenzó con el montaje de la propia cocina. Se instaló un transportador de ángulos y un nivel horizontal para conocer el valor del ángulo de rotación del panel. También se instalaron unas cadenas en el concentrador para fijar el ángulo anterior.

Una vez montada la cocina, se procede al estudio del foco instalando la cocina en la azotea del edificio Betancourt de la Escuela Politécnica de Universidad Carlos III de Madrid. Se pretenden estudiar la influencia sobre la posición del foco de la cocina de los dos ángulos que pueden variar con el tiempo: la altura solar y el ángulo de rotación del concentrador.

Se tomaron fotografías del foco que proyectaba el concentrador sobre un plano horizontal previamente reglado, se realizó una tanda de fotografías variando el ángulo de rotación del concentrador, *ceteris paribus*, para diferentes alturas solares y otra tanda de fotografías manteniendo el ángulo de rotación del concentrador para diferentes alturas solares. Analizando las anteriores fotografías se estableció unas variables que marcaban las diferentes zonas de intensidad lumínica de la incidencia del foco.

La localización de estas variables se realizó mediante inspección visual directa de la imagen con la ayuda de la regla dibujada en el plano donde se proyecta el foco, ya que se marcaba claramente su límite para la vista, sin embargo se ha pretendido dar un soporte más preciso y cuantitativo a la localización de estas variables que marcan el límite mediante visualización directa, así se han analizado tres imágenes para conocer el error que se comete al localizar las variables mediante visualización directa respecto a localizarlas mediante técnicas de tratamiento de imagen.

El estudio mediante tratamiento de imágenes se ha realizado generando varios programas en Matlab, los programas realizados se pueden encontrar en los anexos y son: `errorcamara.m`, `foco.m` y `locX1X2.m`. Estos programas calculan el error que es propio de la cámara con la que se han tomado las fotos y calculan

la posición mediante técnicas de tratamiento de imágenes y de detección de bordes de las variables que marcan las zonas del foco.

Se ha estudiado mediante técnicas de tratamiento de imagen como influyen la superficie del concentrador en la formación del foco, para ello se ha dividido el área del concentrador en varias superficies iguales y se han ido tapando dichas superficies y tomando fotografías del foco con las superficies del espejo tapadas, para analizar la variación del porcentaje de luminosidad del foco al perder superficie del concentrador. Este estudio también se ha realizado mediante un programa generado con Matlab, llamado partesfoco.m.

Por ultimo, una vez conocidas las partes del foco que contienen mayor porcentaje de radiación, se ha estudiado el rendimiento en cuanto al calentamiento de agua en el recipiente de la cocina con el foco posicionado en diferentes localizaciones posibles. Para ello se ha medido la temperatura del agua, utilizando un Data Logger, en el tiempo que se produce el calentamiento. A su vez se ha calculado la radiación incidente sobre el concentrador y se ha calculado el rendimiento entre la energía utilizada para calentar el agua y la radiación que recibe el concentrador en el periodo de tiempo que dura el calentamiento. Finalmente se puede concluir cual es el posicionamiento más óptimo del foco, reduciendo los tiempos de cocinado.

2. INTRODUCCIÓN

2.1. El Sol. [1], [2], [3] y [4]

El Sol es la estrella que se encuentra en el centro del Sistema Solar, constituyendo la mayor fuente de energía electromagnética de este sistema planetario. Asimismo, constituye la fuente de alimentación de las plantas por medio de la fotosíntesis, proceso gracias al cual se convierte la energía de la radiación solar en energía química, la causa de los flujos atmosféricos y del agua, el origen de la luz y el calor que hace posible la vida. La mayoría de las fuentes de energía usadas por el hombre derivan indirectamente del Sol. La energía que absorben la atmósfera, los océanos y los continentes puede ser de unas 7.900 veces el consumo de energía primaria anual del planeta, como puede observarse en la Tabla 2.1:

Flujo Solar Anual y Consumo de energía humano	
Solar	3.850.000 EJ
Energía Eólica	2.250 EJ
Energía para fotosíntesis	3.000 EJ
Uso energía primario (2005)	487 EJ
Electricidad (2005)	56,7 EJ

Tabla. 2.1. Flujo Solar Anual y Consumo de energía humano. (1EJ= 10^{18} J)
(Fuente: Wikipedia)

2.2. Radiación Solar

Para conocer cuánta energía solar alcanza nuestro planeta, se necesita conocer cuál es la posición relativa Sol-Tierra. A tal efecto, a continuación se describe cuáles son los parámetros fundamentales para este cálculo.

2.2.1. Radiación extraterrestre y radiación en superficie [5]

La radiación extraterrestre hace referencia a la energía solar recibida por unidad de tiempo, en una superficie de área unidad perpendicular a la dirección de propagación de la radiación, y situada fuera de la atmósfera a la distancia media entre la tierra y el sol. Es una constante universal actualmente cifrada en 1.367 W/m^2 (Fuente: *Tema 4 Asig. Energías Renovables. Ing.Industrial. UC3M*).

La radiación que llegue a la superficie será menor que la extraterrestre debido a que los rayos solares, en su paso a través de la atmósfera, se verán sometidos a procesos de absorción, difusión, dispersión y reflexión y, además, ésta no será siempre perpendicular a la superficie de incidencia, como puede observarse en la figura 2.1.

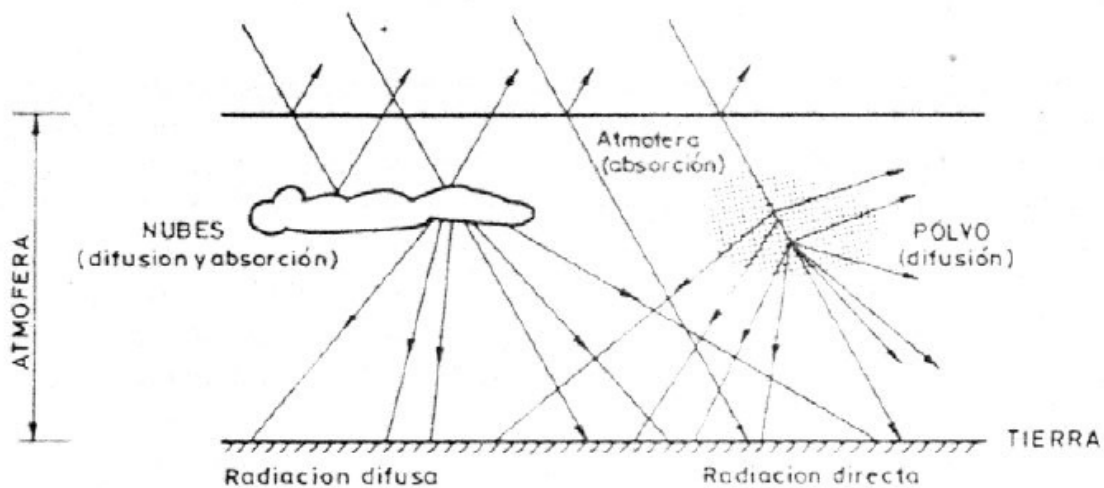


Fig. 2.1. Efectos atmosféricos sobre radiación solar.

(Fuente: *Apuntes Energías Renovables*)

La cantidad neta de radiación que llega a la superficie es, por tanto, menor, su espectro varía y, además, no llega toda de la misma dirección (aparece radiación difusa). Por ejemplo, a Almería llegan 202 W/m^2 (media anual) (Fuente: *Tema 4 Asig. Energías Renovables. Ing.Industrial. UC3M*).

2.2.2. Declinación [5], [6] y [7]

El eje de la tierra está inclinado $23,45^\circ$ respecto a la perpendicular del plano que determina la órbita alrededor del sol, es decir, el ángulo que forman la dirección de los rayos de sol y el ecuador varía sinusoidalmente entre $\pm 23,45^\circ$. Este concepto recibe el nombre de DECLINACIÓN (δ) y se define como positiva en el hemisferio norte y negativa en el hemisferio sur. La declinación se calcula como:

$$\delta = 23,45 \cdot \sin\left(360 \cdot \frac{284 + n}{365}\right) \quad (1)$$

La declinación sigue los valores descritos por la figura 2.2 a lo largo del año.



Fig. 2.2. Declinación a lo largo del año.

(Fuente: Apuntes Energías Renovables)

2.2.3. Ángulo horario [5], [6] y [7]

El ángulo horario (ω), para una localización, es el definido por dos planos que contengan al eje de la tierra, uno de los cuales pasa por la localización y otro por el sol. Cuando el sol está en su cenit, el ángulo horario es nulo, tomando valores negativos antes de dicho instante y positivos después, según la velocidad de rotación de la tierra: $15^\circ/\text{hora}$. Se calcula como:

$$\omega = 15^\circ \cdot (hsolar - 12) \quad (2)$$

La hora solar ($hsolar$) se calcula respecto al momento en el que el sol está en su cenit, las 12:00 hora solar. Para calcular la hora solar en cualquier momento, se tiene que conocer a qué hora del día el sol llega a su cenit, así si esto se produce, por ejemplo, a las 14:04h (de reloj), esta hora serán las 12:00 hora solar ($hsolar = 12$ y $\omega = 0$).

2.2.4. Altura solar, ángulo cenital y ángulo azimutal [5], [6] y [7]

La altura solar (θ) se define como el ángulo que forma con la horizontal una línea que une al observador con el Sol. Para calcular la altura solar se emplea la siguiente expresión:

$$\theta = \arcsen(\sen(\phi) \cdot \sen(\delta) - \cos(\phi) \cdot \cos(\delta) \cdot \cos(\omega)) \quad (3)$$

Donde ϕ , es la latitud del emplazamiento considerado. En el caso que nos ocupa, Leganés, la latitud es de $40,19^\circ$.

El ángulo cenital, θ_z , es el ángulo complementario a la altura solar.

El ángulo azimutal, γ , es aquel que forma la proyección sobre la superficie terrestre de la línea que une al observador con el Sol y la dirección Sur. El ángulo azimutal toma valor 0 cuando el Sol se sitúa sobre la dirección Sur,

valores negativos cuando se encuentra hacia el Este y valores positivos cuando se posiciona hacia el Oeste. Se calcula de la siguiente manera:

$$\gamma = \arcsen\left(\frac{\cos(\delta) \cdot \sin(\delta)}{\cos(\theta)}\right) \quad (4)$$

A continuación, en la figura 2.3 puede observarse una representación gráfica de los ángulos:

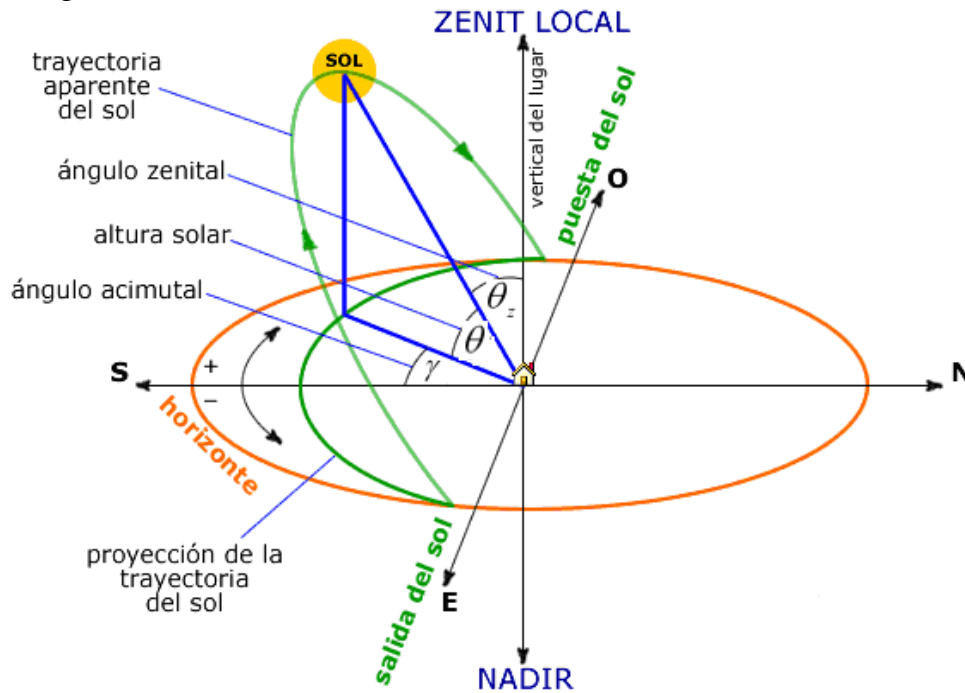


Fig. 2.3. Altura solar, ángulo cenital y ángulo acimutal.
(Fuente: Universidad de Jaén)

En la figura 2.4 se representa la posición del sol en el cielo cuando se mira en dirección sur. Se dibujan las trayectorias para un día representativo de cada mes indicando el tiempo solar. Cada gráfico sirve para dos latitudes iguales, norte y sur, convirtiendo los días adecuadamente.

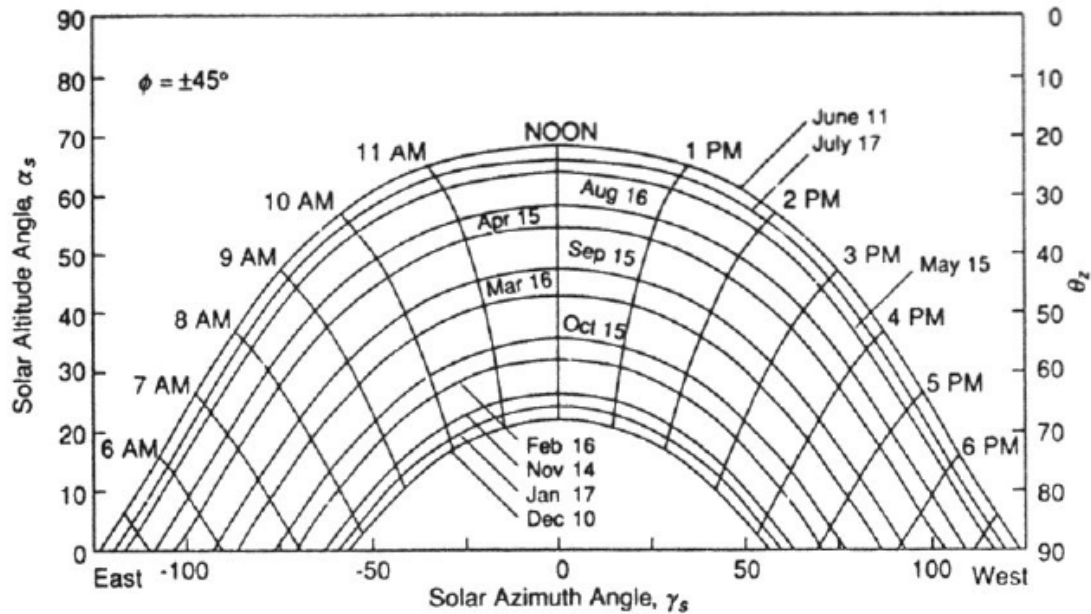


Fig. 2.4. Posición solar para latitud $\phi = \pm 45^\circ$.

(Fuente: Apuntes Energías Renovables)

2.3. Reflexión y absorción [5], [6] y [7]

La reflexión es el cambio de dirección de un rayo o una onda que ocurre en la superficie de separación entre dos medios, de tal forma que regresa al medio inicial. El rayo incidente, el rayo reflejado y la recta normal, deben estar en el mismo plano (mismo medio) con respecto a la superficie de reflexión en el punto de incidencia. El ángulo formado entre el rayo incidente y la recta normal es igual al ángulo que existe entre el rayo reflejado y la recta normal (ver figura 2.5).

La absorción de la radiación electromagnética es el proceso por el cual dicha radiación es captada por la materia. Cuando la absorción se produce dentro del rango de la luz visible, recibe el nombre de absorción óptica. Dicha radiación, al ser absorbida, puede o bien ser remitida o bien transformarse en otro tipo de energía, como calor o energía eléctrica.

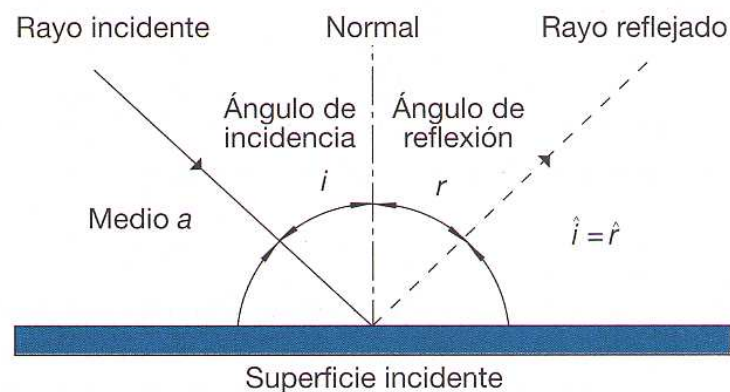


Fig. 2.5. Reflexión. (Fuente: Wikipedia)

2.4. Radiación en función de la longitud de onda [8]

Como se puede ver en la figura 2.6, la radiación que pertenece a la zona de longitud de onda visible es un estrecho rango, sin embargo la zona visible es la zona donde mayor potencia emisiva se registra.

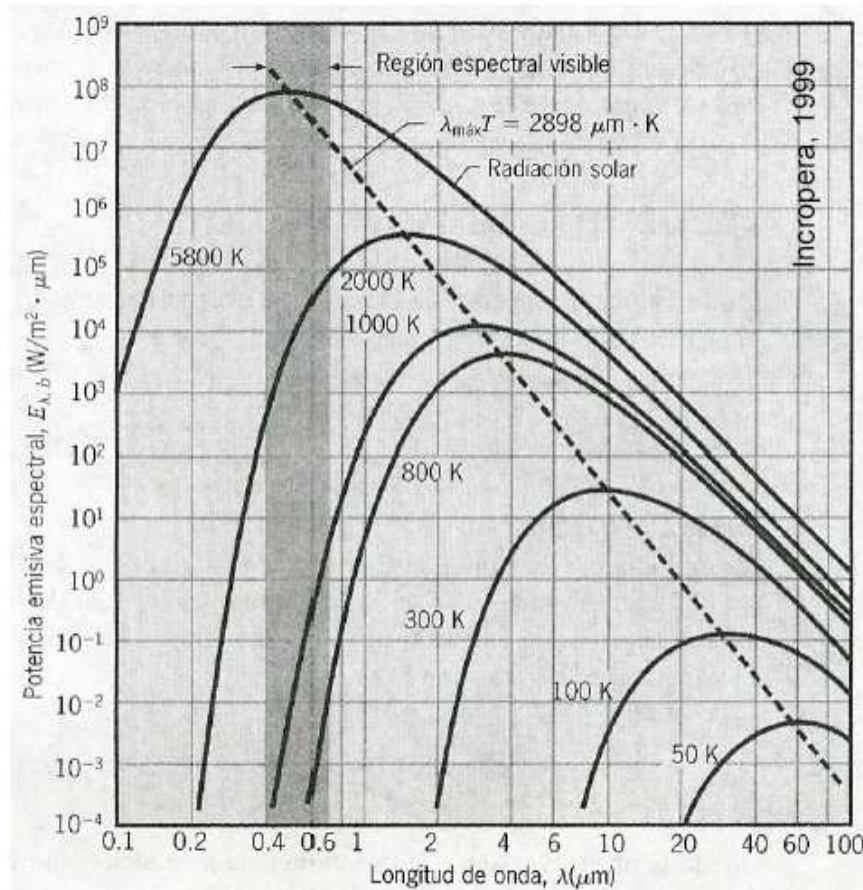


Fig. 2.6 Potencia emisiva en función de λ . (Fuente: Incropera, 1999)

Al comparar dos imágenes en el rango visible de dos zonas emisivas con distinta luminosidad, se puede determinar que la que tenga mayor luminosidad tendrá mayor potencia emisiva en el rango de longitud de onda visible, esta no será proporcional a la energía emisiva total, ver ecuación 5, para toda longitud de onda, pero tendrá un nivel relativo de potencia emisiva en el visible mayor que la imagen de la zona de menor luminosidad.

$$E_b = \int_{\lambda=0}^{\infty} E_{\lambda,b}(\lambda) d\lambda \quad (5) \text{ Ley de Stefan-Boltzmann.}$$

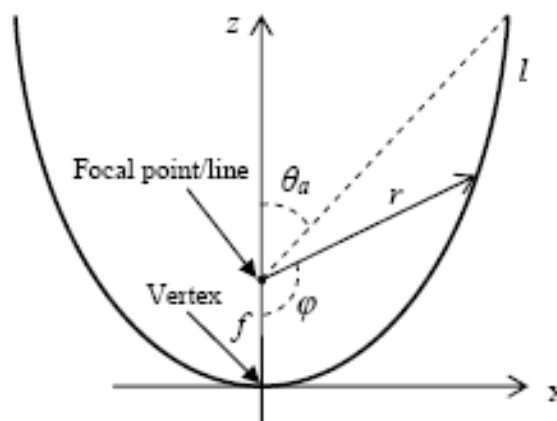
2.5. Concentrador semiparabólico [9] y [10]

El comportamiento de un concentrador semiparabólico es muy similar al de un concentrador parabólico (CPC, Compound Parabolic Concentrators). Los concentradores semiparabólicos utilizan la mitad, o menos de la mitad, de la parábola que utilizaría un CPC. Los concentradores parabólicos pueden estar desarrollados en dos o tres dimensiones. Una parábola básica puede describirse por:

$$r = \frac{2f}{1 + \cos \varphi} \quad (6)$$

Donde f es la longitud focal, r es el radio vector, y φ es el ángulo entre el eje z y el radio vector. El eje z constituye el eje óptico.

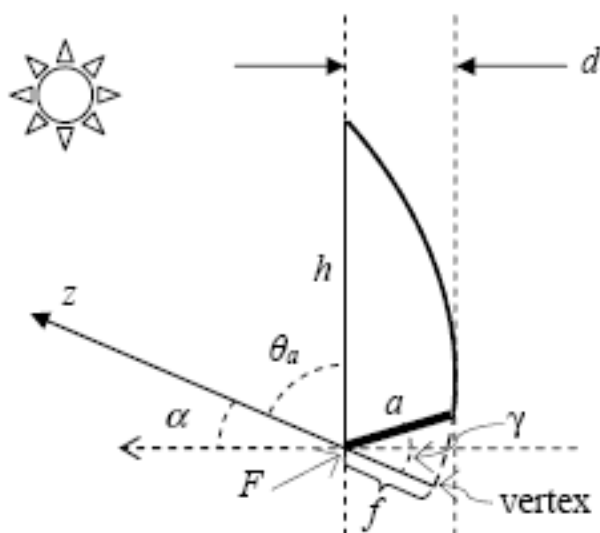
En los concentradores que utilizan un sistema especular semiparabólico de dos dimensiones, como es el caso que nos ocupa, la luz que incide paralelamente al eje óptico (eje z) es concentrada en una línea en el foco del sistema, ver figura 2.7 Los rayos que inciden con un ángulo respecto al eje óptico, pero estén dentro del ángulo de aceptación, θ_a , de la parábola, serán reflejados hacia un punto entre el vértice y el punto focal. Para ángulos de incidencia que estén fuera del intervalo, toda la radiación será rechazada. De esta manera, la radiación directa y difusa que incida con el ángulo debido será reflejada hacia el foco. Como la radiación difusa proviene de todas direcciones, será muy poco porcentaje de la misma la que acabe aportando a la formación del foco, por lo que en los cálculos la radiación difusa se desprecia.



*Fig. 2.7. Parábola. Los símbolos están descritos en el texto.
(Fuente: Brogen, 2004)*

Un dibujo esquemático de un concentrador semiparabólico se muestra en la figura 2.8 La letra h es la distancia desde el punto focal, F , hasta el comienzo del espejo semiparabólico. La letra a , se refiere a la distancia entre el foco y el

final del espejo semiparabólico. La inclinación del eje óptico (eje z) del espejo semiparabólico es representada por α . En la figura, f es la longitud focal, θ_a es el ángulo entre el eje óptico y el vector que une el punto focal, F , con el inicio del espejo, y γ es el ángulo entre el eje óptico y el vector que une F con el final del espejo. La geometría del sistema puede variar, por ejemplo, variando los ángulos α y γ .



*Fig. 2.8. Concentrador semiparabólico. Los símbolos están descritos en el texto.
(Fuente: Brogen, 2004)*

Hasta aquí se ha descrito el comportamiento de concentradores semiparabólicos ideales, es decir, que concentran la luz de forma perfectamente alineada. A continuación, se va a exponer la distribución del flujo de luz para reflectores imperfectos.

Los problemas que pueden surgir con estos reflectores imperfectos se pueden resumir en irregularidades en la colocación del reflector y en la dispersión del haz de luz por el ángulo de incidencia de los rayos del sol. Este haz incidente es un cono de $0,53^\circ$ de ancho (su mitad $0,267, 0,16'$). Para un haz que incida paralelo a la normal de la abertura, a , se puede observar el haz reflejado en la figura 2.9.

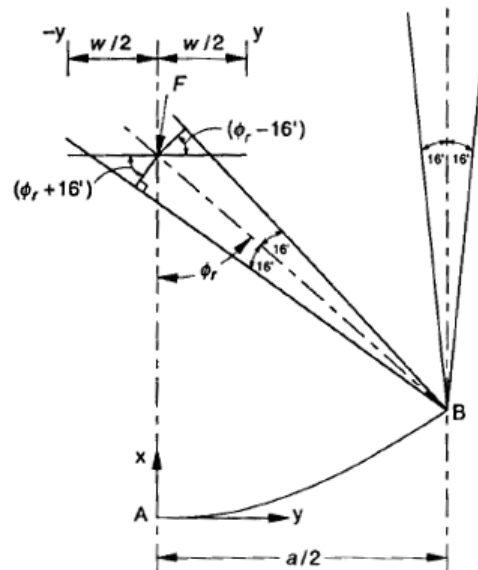


Fig. 2.9. Incidencia de haz de luz y su reflexión con una dispersión.
(Fuente: Duffie & Beckman, 1980)

2.6. Sistemas Solares [11]

Los sistemas solares se pueden clasificar según la figura 2.10.

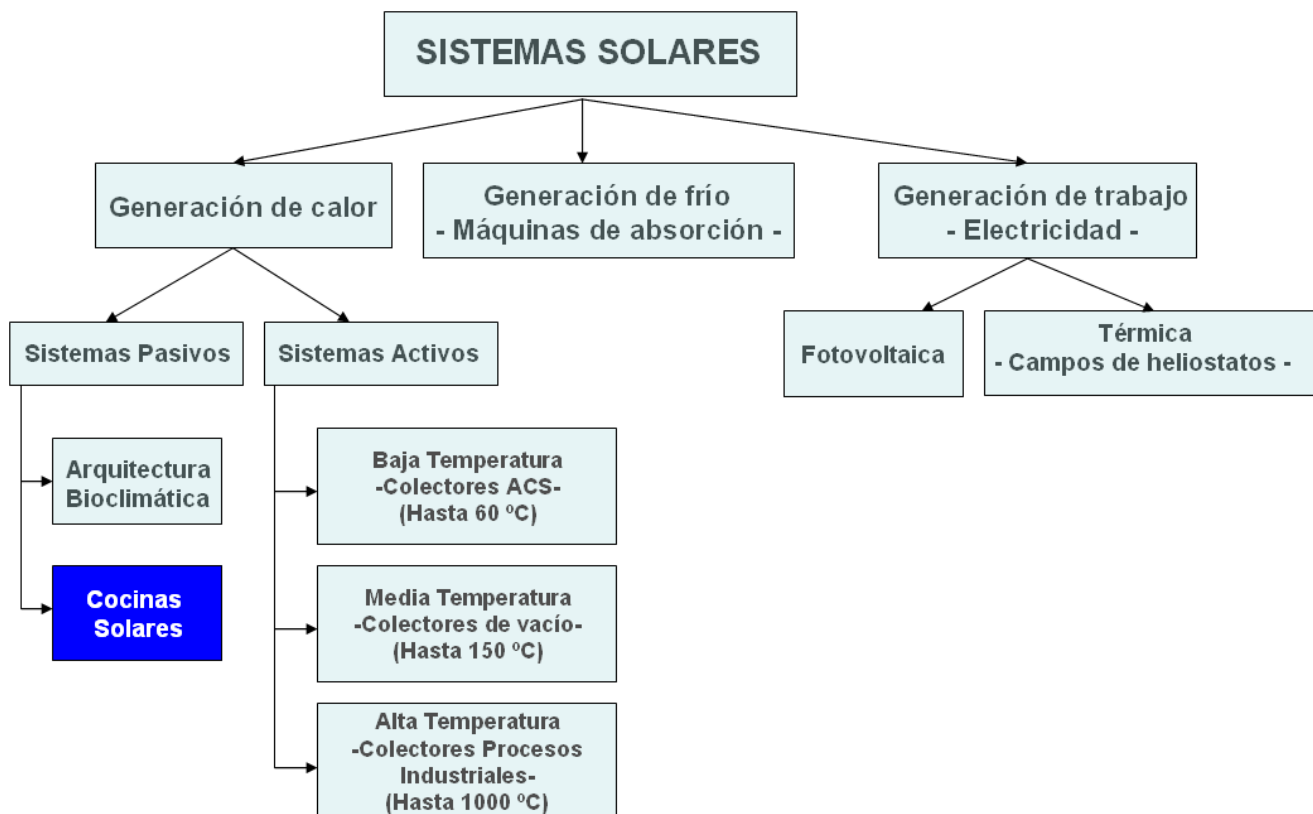


Fig. 2.10. Clasificación de los Sistemas Solares.

El estudio realizado se centra en las cocinas solares, sistemas de generación de calor pasivos.

2.7. Cocinas Solares [11] , [12], [13] y [14]

2.7.1. Deforestación

Para más de un tercio de la población del mundo la tarea de cocinar supone la búsqueda diaria de madera. Esta tarea fue en un tiempo simple, pero ahora que los bosques están contrayéndose cada vez resulta más complicada.

Los países más pobres dependen fuertemente de la madera como fuente de energía primaria. Por ejemplo, Nepal deriva el 87% de toda su energía de la madera, y en el Alto Volta, el 94% de toda la energía es de la madera, la mayor parte es quemada en fuegos domésticos para cocinar. Nueve de cada diez personas en los países más pobres dependen de la leña como fuente principal de combustible. Una familia promedio quema cerca de 4 toneladas de madera por año, lo cual es casi el doble de la madera que cada familia en países ricos usa para construcción, papel, muebles y leña. Del 50 al 70% de toda la madera usada en la tierra termina bajo alguna olla para cocinar.

En Asia, la madera abarca el 30% del consumo total de energía. En los países sudasiáticos, entre el 20 y 80% de la demanda de energía es cubierta por la madera. El sector más consumidor es el doméstico.

Para el continente africano, en la mayoría de los países las fuentes de energía para el sector doméstico son la leña y el carbón y, particularmente, las áreas rurales son las que más dependen de la leña. En Malawi, cerca del 60% de la demanda de leña responde a familias rurales, principalmente para la preparación de alimentos. En Kenya, en 1987 la leña figuró en las estadísticas de la energía nacional con un 73%, y ha continuado satisfaciendo las necesidades energéticas de la población hasta la actualidad.

En América Latina tenemos el caso de Nicaragua, donde la leña es la mayor fuente de energía, así como el primer producto forestal. En 1998 se estimó que la leña representaba un 58% de la energía consumida y un 70% de toda la madera consumida. El total de consumo es de 2 o 2,5 millones de toneladas por año, con un 90% del total para la cocina doméstica.

Los bosques del mundo están desapareciendo rápidamente. A medida que los precios de la leña suben, más personas se ven forzadas a usar productos derivados del petróleo para combustible. Pero al mismo tiempo, los precios altos del crudo hacen menos posible este cambio al petróleo. Esto a su vez lleva a una presión aumentada en los bosques para proveer leña.

Cuando la leña de fuentes cercanas se termina, la población de las áreas urbanas cambia de la leña al carbón, el cual tiene cerca de un 45% más de energía potencial por unidad de peso que la madera y es, por tanto, más barato transportarlo. Sin embargo, aún con procedimientos de mejora para hacer carbón de la madera, por lo menos un 60% de desvalor calorífico de la madera se pierde en el proceso, en ocasiones hasta un 80%. La cocina con carbón usa desde 1,25 a 3 veces más madera que la cocina con leña.

Durante muchos siglos, los habitantes de una región habían obtenido sus provisiones de madera de un bosque local. Sin embargo, la población crece, y el consumo de madera aumenta (+2% anual). Llegará el momento en que el consumo de madera sea igual a la producción anual y, de ahí en adelante, cualquier árbol extra que sea cortado reducirá la herencia del bosque, es decir, se habrá sobrepasado la tasa de repoblación natural del bosque. Después de 9 años, el 10% del bosque habrá desaparecido. En 12 años, el 20% y, en 10 años más, el bosque habrá sido talado completamente.

El problema es que, a mayor deforestación, menos lluvias y menos capacidad de recuperación de los bosques restantes. Al final, cada vez los bosques están más lejos y las mujeres y los niños (los encargados de que no falte leña) deben dedicar más horas a buscarla. Esto hace que la gente pueda dedicar menos horas a estudiar o a otras dedicaciones más productivas, empeorando así su calidad de vida y sus posibilidades de salir adelante.

Esto puede ser evitado si se reduce el consumo a tiempo. Debe tomarse alguna acción rápida, más allá de una acción puntual para evitar la deforestación. La solución más lógica sería la de una explotación racional de los bosques así como una buena política de reforestación, pero eso no quita que, de forma conjunta, se deban potenciar otras soluciones, como es el caso de las cocinas solares. Las cocinas solares ya son hoy en día una alternativa, o solución real, para combatir o paliar la crisis de la leña como combustible, como puede derivarse de los siguientes motivos:

- Son muy baratas, ya que no utilizan ningún tipo de combustible. Disminuyen la dependencia y el consumo de una energía externa (petróleo, gas, carbón y leña) cada vez más cara.
- Son muy fáciles de usar y generan calor inagotable para cocinar.
- Permiten ahorrar horas de trabajo buscando leña, mejorando así la calidad de vida de mujeres y niños (pueden dedicar más horas a su formación).
- Ayudan a disminuir la emisión de CO₂ a la atmósfera.

2.7.2. Cocinas solares

Alrededor del 50% de los 3.200 millones de toneladas de madera recogida en todo el planeta se quema como combustible. Es decir, que un producto con tantas aplicaciones tecnológicas como la madera se acaba convirtiendo en calor. La energía solar es, en contraposición a la quema de madera, no consumista y no contaminante y, lo que es más, la energía solar es abundante y por lo tanto se convierte en una fuente de energía fiable y sostenible.

Puede ayudar a solventar el problema de la inseguridad en el uso de la energía para cocinar, que es el principal requisito de la energía para el ámbito doméstico. En estas condiciones, las cocinas de energía solar resultan cada vez más atractivas como sustitutas de las cocinas convencionales. Se han llevado a cabo varios intentos en diferentes países para introducirlas y se han logrado éxitos variables.

Las cocinas solares presentan muchas ventajas, como se comentaba anteriormente: económicas, ya que el precio del combustible para cocinar ya no es asequible para muchas familias; ecológicas, puesto que en muchas de estas regiones la deforestación está ligada al uso de madera como fuente de energía; y sociales, debido a que el dinero empleado para la compra del combustible podría ser empleado para comprar comida, medicinas y otros productos básicos de necesidad que mejoran la calidad de vida; unido a que no resultan perjudiciales para la salud.

Esta tecnología puede ser una alternativa viable a los medios actuales de cocina, sin embargo requiere resolver diversos temas críticos para lograr que sea aceptada y difundida. Entre estos aspectos que se deben salvar se incluyen conseguir modelos adaptados a cada lugar, tamaños, capacidades, materiales y diseños óptimos, seguros y fáciles de usar, junto a un coste asequible, pues se parte de la base de que además de ayudar al medio ambiente, ayudan a familias con escasos recursos económicos.

La naturaleza intermitente de la energía solar es la mayor desventaja para la adopción de cocinas solares como solución a los problemas que presentan las técnicas tradicionales, así como la falta de apoyo gubernamental en la introducción de estos proyectos.

Sin embargo, el desarrollo y la popularidad de cocinas solares eficientes que pueden emplearse cuando es factible, podrían reducir sustancialmente los recursos energéticos dedicados para cocinar, además de producir un impacto positivo tanto en la economía de los países en vías de desarrollo como en el desarrollo ecológico del Planeta.

Las cocinas solares presentan otros usos que no sean el de cocinar. Pueden usarse también para hervir agua para beber, proporcionando el acceso a agua esterilizada, libre de agentes patógenos, a millones de personas, previniendo así las enfermedades transmitidas por el agua. Aunque muchas organizaciones de la salud recomiendan que para purificar el agua, ésta debe ser hervida, también es cierto que el agua puede ser pasteurizada a temperaturas por debajo de la de ebullición, rondando los 67-70°C, dependiendo del tiempo de exposición, temperaturas fácilmente alcanzables con las cocinas solares.

Las cocinas también pueden ser utilizadas como secaderos de productos vegetales, frutas y otras sustancias agrícolas, lo cual resulta enormemente importante, ya que si los productos contienen mucha agua, ésta se mantendrá en el ambiente y elevará la humedad, perjudicial también en muchos casos por ser causante de problemas de salud. Además, los productos secos, necesitan menos espacio para ser almacenados y se mantienen mejor conservados durante más tiempo.

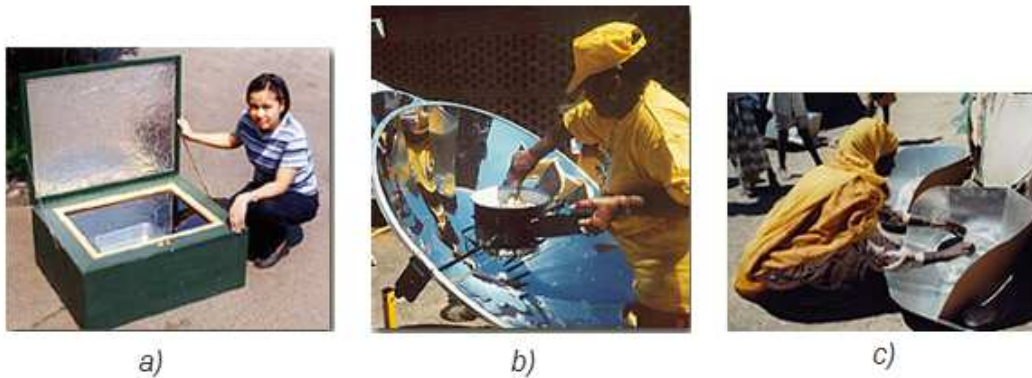
Tipos de cocinas solares

Existen tres tipos comunes de cocinas solares: cocinas/hornos tipo caja, cocinas tipo concentradores parabólicos y cocinas tipo panel. Ver figura 2.11.

Cocinas/hornos tipo caja: cocinan desde moderadas hasta altas temperaturas y ofrecen la posibilidad de acomodar dentro varios platos. Son las más extendidas alrededor del mundo.

Tipo concentradores parabólicos: cocinan rápido a altas temperaturas, pero requieren un frecuente ajuste y supervisión para un obtener un uso satisfactorio. Existen cientos de miles de cocinas de este tipo, uno de los principales fabricantes es China. La cocina semiparabólica PRIMROSE pertenece a esta categoría, concentrándose los rayos de luz en un foco longitudinal.

Tipo panel: cocinas que incorporan elementos de las cocinas tipo caja y tipo concentrador parabólico. Son de construcción simple y relativamente baratas, tanto su compra como su construcción. Es el kit de cocina solar mas utilizado.



*Fig. 2.11. Cocinas tipo caja (a), tipo concentrador parabólico (b) y tipo panel(c).
(Fuente: <http://solarcooking.wikia.com>)*

2.8. Cocina PRIMROSE [14]

La cocina PRIMROSE, también conocida como Nelpa, es una combinación basada en las cocinas de panel y de concentración. Se consigue cambiando las posiciones del panel y la cocina, y en lugar de estar el panel sobre la olla, ahora todo el conjunto se da la vuelta para que el panel esté en la zona inferior (de ahí el nombre de "Nelpa", que hace referencia a la palabra "panel" con las sílabas invertidas), considerándose una asociación con las cocinas de concentración por ser el panel inferior un espejo reflectante.

La Primrose fue inventada por Roger Bernard, y mejorada por Bernie Mueller a partir de la combinación arriba especificada. Se construye como una cocina en la que destaca la ventaja de poder permanecer a la sombra mientras se cocina y controlar la comida mientras tanto. Ver figuras 2.12, 2.13 y 2.14.



Fig. 2.12. Cocina Primrose (Fuente: <http://solarcooking.wikia.com/wiki/Primrose>)

El calentamiento de los alimentos o del líquido contenido en el recipiente, se consigue mediante la concentración de los rayos solares mediante un espejo semiparabólico en un foco, el cual se sitúa en la parte inferior del recipiente. Casi todo el perímetro del recipiente se encuentra dentro de un cubículo que favorece el efecto invernadero. También se producen fenómenos de radiación en la parte superior del recipiente y los laterales del cubículo de efecto invernadero, pero esta radiación es despreciable frente al flujo de calor que se recibe del concentrador semiparabólico.

Se recomienda aislar la parte superior del recipiente para evitar transferencia de calor convectiva con el ambiente.

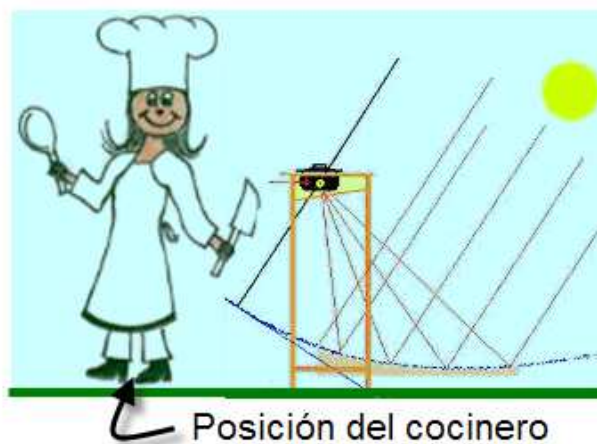


Fig. 2.13. Cocina Primrose. Posición del cocinero.

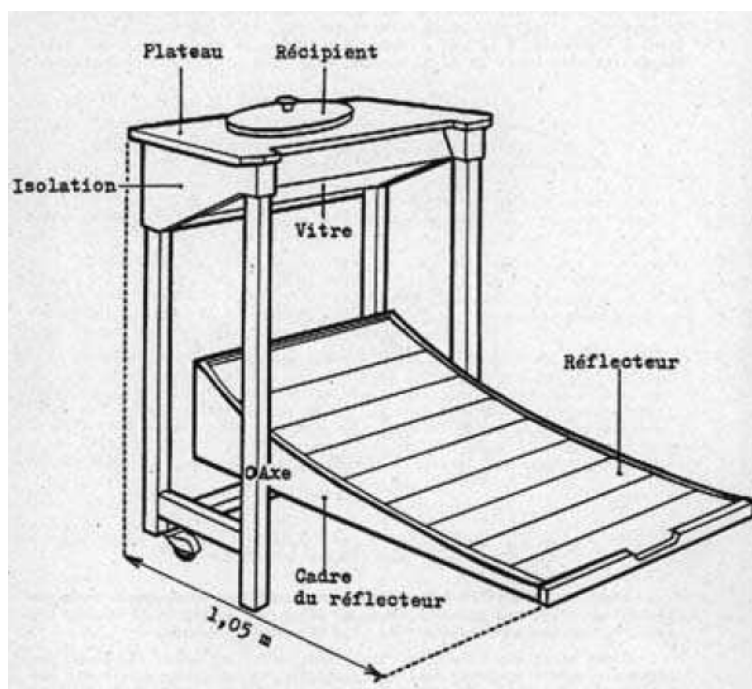
Ventajas

- La olla se encuentra en el exterior, no encerrada, por tanto resulta accesible a la hora de manipular, probar, etc.
- Dada esta configuración, el vapor no condensa en el interior de las superficies de vidrio o plástico.
- La tapa de plástico que favorece el efecto invernadero, tiene una posición permanente, lo que impide daños y facilita el mantenimiento.
- La incidencia de los rayos del Sol es por los laterales y la zona inferior, que están en contacto con el alimento. En el caso de otros modelos de cocina, la incidencia es por la zona de la tapa en la cual no hay alimento.

El panel superior de la cocina se utiliza, además, como mesa para preparar los alimentos o para poner los utensilios de cocina como cucharas y demás cubiertos.

Además, la configuración ofrece la opción de que a la vez de que el panel reflectante capta la radiación solar, la persona encargada de la cocina puede permanecer a la sombra pues se sitúa por detrás de la olla.

La necesidad de ser ajustada y el momento preciso se perciben a simple vista, y se consigue fácilmente moviendo el panel hasta que un reflejo de la olla se ve a ambos lados de las asas de la misma o en su base, consiguiendo alinear dicho reflejo en el centro de la base. Después de cocinar, la cocina puede plegarse recogiendo el panel reflectante.



*Fig. 2.14. Imagen esquemática cocina Primrose.
(Fuente: Manual Cocina PRIMROSE)*

Desventajas

- Parte del calor se pierde por la tapa que no tiene aislamiento, al igual que el vapor (se debe añadir para lograr mejor aislamiento y así reducir el tiempo de cocción).
- El diseño es más complicado y requiere una orientación constante para seguir el recorrido del Sol a lo largo del día.
- El precio es más elevado por sus facilidades y comodidades de utilización, así como el empleo de materiales más caros.

3. MONTAJE, INSTALACIÓN Y TEORÍA DE LA CARACTERIZACIÓN

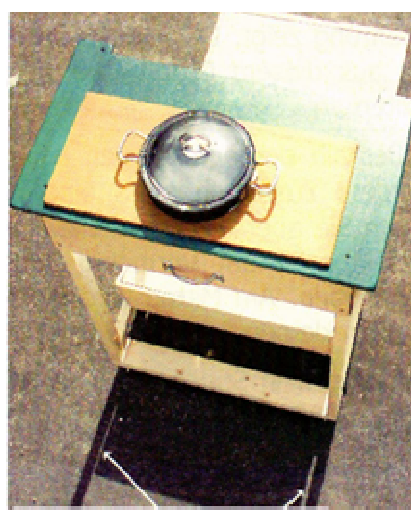
Para realizar la caracterización de la cocina en la que está centrado este proyecto, se procedió en primer lugar al montaje de la misma, ya que se recibió embalada y en el formato que el fabricante la entrega para optimizar el transporte. El kit incluye toda la tornillería necesaria. Además, incluye un manual de montaje en alemán y francés.

En el manual se detalla cómo construir la cocina con materiales propios o con los adquiridos al fabricante, de esta manera se puede solicitar sólo el manual de montaje para construirla pudiendo, de esta manera, reducir significativamente el precio final de la cocina. La comercialización de sólo la guía de montaje puede ser muy útil para países o zonas con pocos recursos monetarios pero que cuenten con recursos materiales, así como para programas que fomenten la difusión de estas cocinas adquiriendo los materiales de un tercer fabricante que pueda ofrecer economías de escala para la reducción del precio unitario de la cocina.

Una vez montada, se instalaron un transportador de ángulos y un nivel en el punto de rotación del panel reflector, para poder medir el ángulo de rotación del panel en los trabajos de caracterización. También se instalaron unas cadenas para anclar el panel a la estructura de la mesa, consiguiendo que el panel no se mueva en la toma de medidas.

La toma de datos para la caracterización de la cocina se ha realizado manteniendo siempre la cocina orientada hacia el sol, es decir, con el ángulo azimutal de la cocina respecto al sol correctamente alineado. Este procedimiento es muy simple ya que sólo es necesario fijarse en las sombras proyectadas por la cocina e ir posicionándola correctamente con el movimiento del sol.

El posicionamiento se realiza cada 15 minutos aproximadamente, para ello se coloca la cocina un poco mas adelantada respecto al movimiento del sol para no tener que reorientarla continuamente. La cocina orientada correctamente respecto al ángulo azimutal se representa en la figura 3.1.

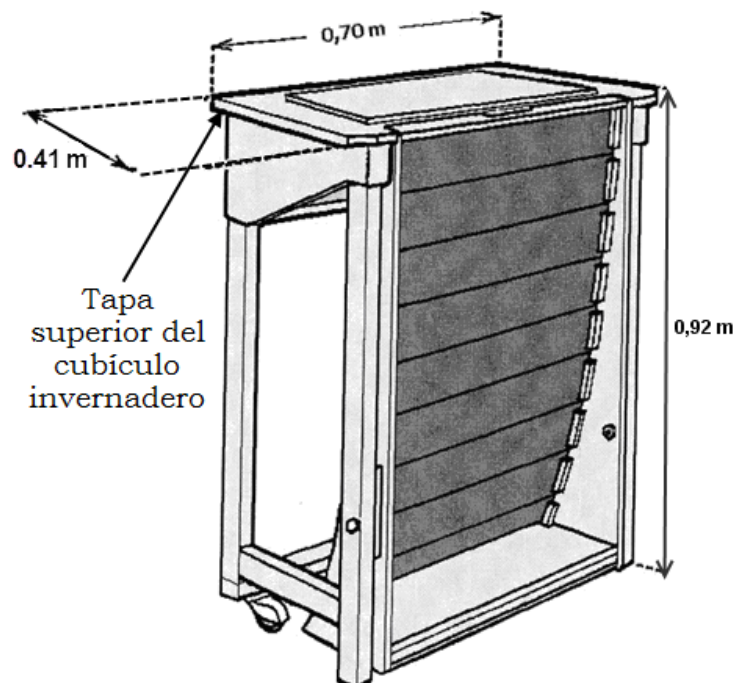


**Orientación adecuada
respecto al sol.**

*Fig. 3.1. Orientación respecto al sol, ángulo azimut.
(Fuente: Manual Cocina PRIMROSE)*

3.1. Medidas de la Cocina PRIMROSE

En la figuras 3.2, 3.3 y 3.4, se detallan algunas de las medidas mas significativas de la cocina, para unas medidas más detalladas consultar los anexos.



*Fig. 3.2. Cocina PRIMROSE con el concentrador recogido.
(Fuente: Manual Cocina PRIMROSE)*

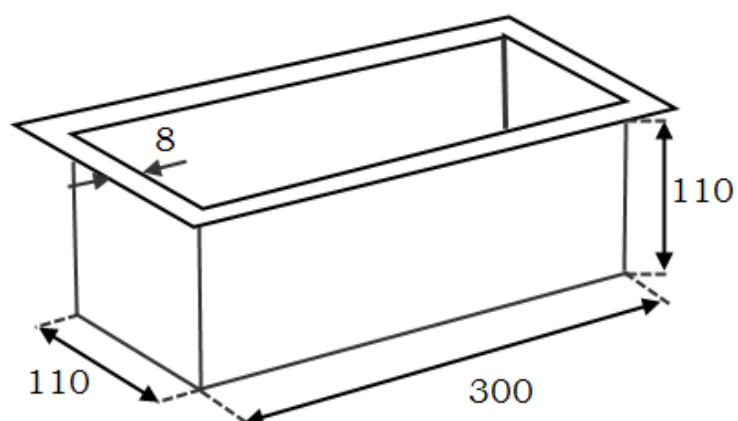


Fig. 3.3. Medidas del recipiente para cocinar.

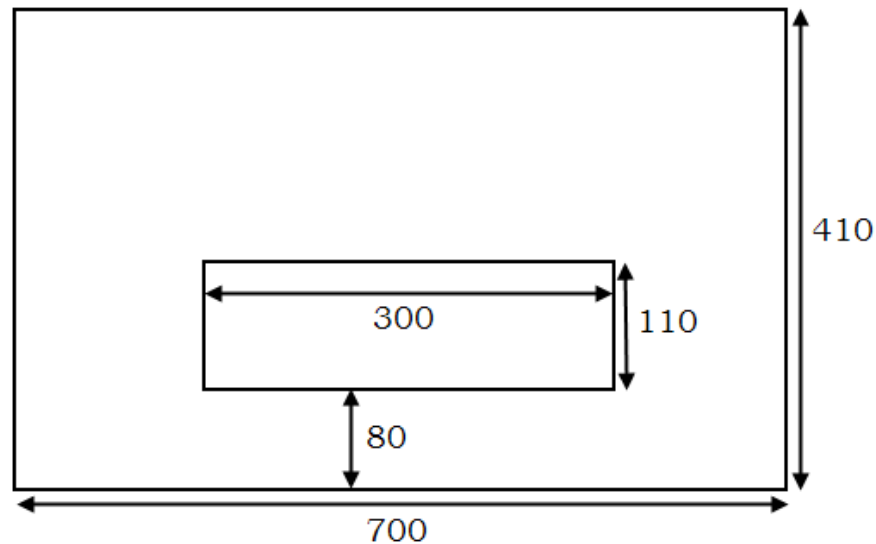


Fig.3.4. Medidas tapa superior del invernadero.

3.2. Medidas del Concentrador Semiparabólico

El concentrador semiparabólico se monta sobre un soporte de madera, cuyas dimensiones y ángulos son importantes para el cálculo trigonométrico del movimiento del concentrador y del sol. Ver figura 3.5. Las líneas negras son la representación esquemática en perfil de dicho soporte, siendo la línea semiparabólica superior el concentrador.

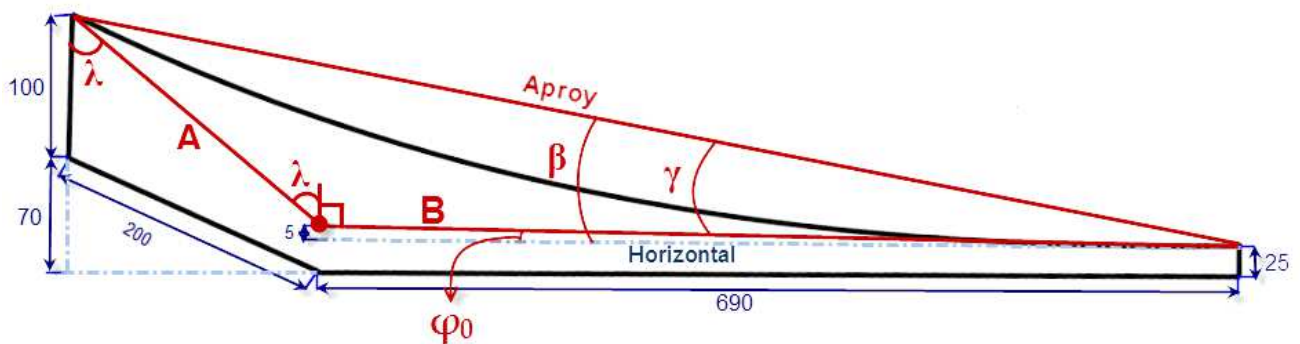


Fig. 3.5. Concentrador.

Segmentos:

- **Aproy:** Segmento que une los extremos del concentrador. Se le denomina así porque hace referencia al área proyectada del colector.
- **A:** une un extremo del concentrador con el punto de rotación.
- **B:** une el punto de rotación con el otro extremo del concentrador.

Ángulos:

- β : ángulo formado entre la Horizontal y el segmento Aproy.

- λ : ángulo formado entre A y el extremo del soporte del concentrador y su paralela.
- φ_0 : ángulo formado entre el segmento B y la Horizontal.
- γ : ángulo formado entre los segmentos Aprox. y B.

Los siguientes cálculos están en mm.

Cálculo de φ_0 :

$$\varphi_0 = \arctg\left(\frac{5}{690}\right) = 0,415^\circ \quad (7)$$

Cálculo de λ :

Distancia vertical desde el punto superior extremo del concentrador hasta el punto de rotación: **140 mm.**

Distancia horizontal desde el punto de rotación hasta el extremo izquierdo del concentrador (l_0): **187,3 mm.**

$$l_0 = \sqrt{200^2 + 70^2} = 187,3 \quad (8)$$

$$\lambda = \arctg\left(\frac{187,3}{140}\right) = 53,22^\circ \quad (9)$$

Cálculo distancia segmentos A y B:

Aplicando el Teorema de Pitágoras:

$$A = \sqrt{140^2 + 187,3^2} = 233,9 \quad (10)$$

$$B = \sqrt{5^2 + 690^2} = 690,02 \quad (11)$$

Cálculo ángulo γ :

Ley del coseno:

$$(Aprox)^2 = A^2 + B^2 - 2AB\cos(\lambda + 90^\circ) \quad (12)$$

Despejando se obtiene:

$$Aprox = 888,4 \text{ mm}^2$$

$$A^2 = B^2 + C^2 - 2B(A_{proy})\cos(\gamma); \quad (13)$$

Despejando se obtiene:

$$\gamma = 9.06^\circ$$

Área proyectada:

El **área proyectada** del colector es el área contenida en el plano formado por el segmento **Aproy** y el ancho del soporte del concentrador, que mide 545 mm.

Esta área proyectada, haciendo una similitud con el colector plano inclinado, es el área sobre la que se va a distribuir la radiación recibida del sol en el concentrador semiparabólico. El plano formado por el área proyectada se va a mover respecto a la horizontal según el ángulo β . Ver figura 3.6.

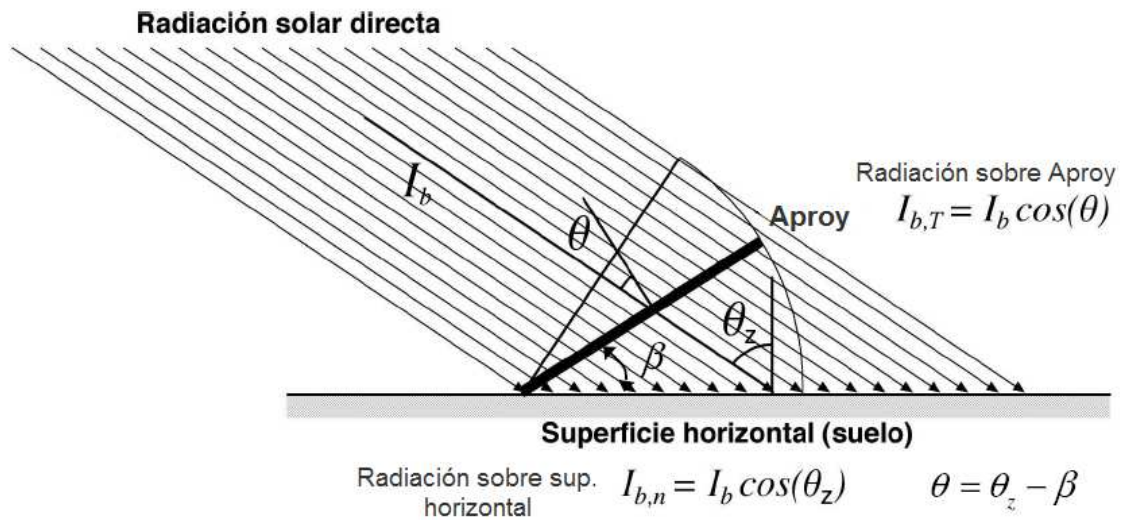


Fig. 3.6 .Área proyectada del concentrador.

En el caso del concentrador semiparabólico el ángulo β , se descompone como se representa en la figura 3.5:

$$\beta = \gamma + \varphi_0 - \alpha \quad (14)$$

Por lo que la radiación que recibe el plano del área proyectada se calcula como:

$$I_{A_{proy}} = I_{global} \cdot \cos \theta \quad (15)$$

I_{global} : es la radiación global directa.

θ : es el ángulo que existe entre los rayos del sol y la normal del plano que contiene al área proyectada. $\theta = \theta_z - \beta$. (16)

La energía puede calcularse como la integral de la potencia respecto al tiempo.

$$E = \int_{t_0}^{t_1} W dt \quad (17)$$

3.3. Técnicas de medida

3.3.1. Medida del ángulo de rotación del panel

El ángulo de rotación del panel, denominado α , es el ángulo que forma la horizontal con un segmento paralelo al lado a de la estructura que soporta el concentrador semiparabólico. Ver figura 3.7.

El transportador de ángulos se ha instalado con los 90° paralelos al lado inferior del soporte del espejo o concentrador (línea discontinua verde) y unido al soporte del espejo, de forma que gira solidario a él, por lo que la marca de 90° del transportador de ángulos es la línea azul de la figura 3.7.

La varilla instalada en una de las patas de la mesa, funciona como nivel, indicando la posición de la horizontal, de esta forma cuando se mueve el concentrador, se pueden observar los grados, mediante el transportador de ángulos, que se mueve el panel respecto a la horizontal. Se ha determinado que el ángulo α , sea positivo si la rotación es contraria a las agujas del reloj.

La varilla indica en el transportador de ángulos el ángulo que ha rotado el panel. Para calcular α , habrá que restar a ese ángulo marcado en el transportador de ángulos 90° , que corresponden a su origen:

$$\alpha = (\text{áng. Transporta ángulos}) - 90 \quad (18)$$

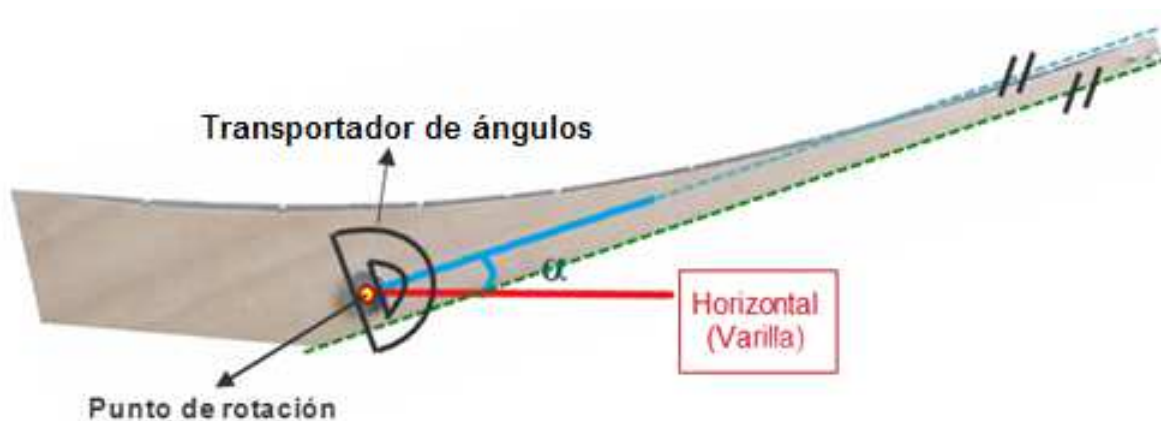


Fig. 3.7. Imagen esquemática de perfil del panel, soporte del espejo.

Este ángulo α se tendrá que ir variando cambiando los eslabones de la cadena que sostienen el panel, según el movimiento del sol, para lograr que el foco se sitúe incidiendo convenientemente en el recipiente.

3.3.2. Cálculo de la hora solar

La hora solar es la hora que marcaría un reloj solar al que no se le ha hecho ninguna corrección. Para calcularla utilizamos la página web: <http://www.golden-hour.com/>, donde se indica, seleccionando un día concreto, la hora en que sale y se pone el sol, también indica el momento en que se alcanza el mediodía solar (12 hora solar). Para el cálculo de la hora solar se procede como se indica a continuación, el cálculo hay que hacerlo teniendo en cuenta el sistema sexagesimal en que se establece las horas:

$$\text{hora solar} = \text{hora oficial} - \text{hora mediodía solar} + 12 \quad (19)$$

Por ejemplo: el día 4 de Agosto de 2011, el mediodía solar se produjo a las 14:21h, hora oficial en Leganés. Si se quiere conocer cuál es la hora solar para las 12:15h hora oficial, el cálculo sería el siguiente:

Primero se pasa a decimal la hora en sistema sexagesimal:

$$\text{hora mediodía oficial} = 14:21h \rightarrow 14 + 0.21 \cdot \frac{100}{60} = 14.35 \text{ hora mediodía solar en decimal}$$

$$\text{hora oficial} = 12:15h \rightarrow 12 + 0.15 \cdot \frac{100}{60} = 12.25 \text{ hora oficial en decimal}$$

$$\text{hora solar} = (12.25 - 14.35 + 12) = 9.9 \text{ hora oficial en decimal}$$

$$\text{hora oficial en decimal} = 9.9 \rightarrow 9 + 0.9 \cdot \frac{60}{100} = 9.54 \rightarrow 9:54 \text{ hora oficial en sexagesimal}$$

El paso de la hora sexagesimal a hora decimal se ha utilizado frecuentemente en los programas desarrollados para los cálculos y los gráficos realizados.

3.3.3. Visualización directa del foco

Para el estudio de la formación, movimientos y características del foco de la cocina con concentrador semiparabólico, se ha retirado la parte superior de la mesa, donde se coloca el recipiente y que forma la tapa superior de madera del cubículo que existe para favorecer el efecto invernadero, donde se aloja el recipiente. En su lugar se ha instalado un plano formado por cartón, con una regla dibujada, para poder localizar y caracterizar la formación del foco, mediante un único plano.

La observación directa del foco que se forma con el concentrador semiparabólico se recoge en la figura 3.8. Se puede apreciar que el foco se desarrolla a lo largo de la dirección transversal de la mesa, de ahí que el recipiente usado para calentar los alimentos tenga una forma alargada para aprovechar todo lo posible la concentración de los rayos de luz. Se puede observar que en la parte lateral del foco hay unas imperfecciones debidas a efectos de bordes: la colocación del espejo concentrador se hace atornillando el espejo a la estructura de madera, esto provoca que en los extremos el espejo concentrador no quede totalmente llano sino que sufrirá discontinuidades de convexidad y concavidad.

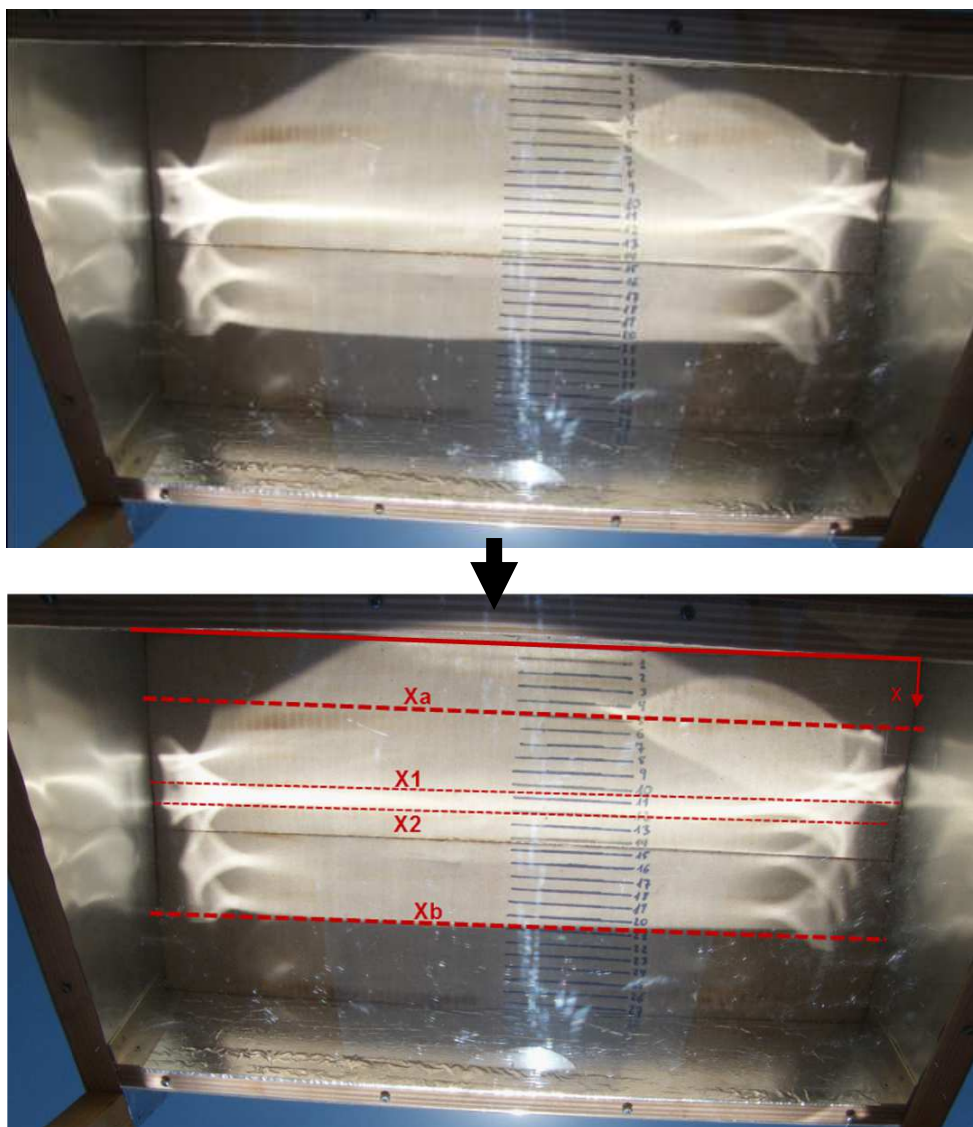


Fig. 3.8. Imagen del foco desde el suelo, misma imagen con las distintas zonas señaladas.

En la figura 3.8 se puede observar que el foco tiene distintas zonas, dependiendo de la intensidad de la luz, es decir, el foco tiene mayor

concentración en unas zonas que en otras. A tenor de la luminosidad podemos establecer que la totalidad del foco que se proyecta sobre el plano se localiza entre las líneas denominadas como Xa y Xb , y que existe una zona de máxima luminosidad entre $X1$ y $X2$, estas variables dependen de la rotación del concentrador y del movimiento del sol. Las zonas que se localizan por encima de Xa se deben a imperfecciones en el concentrador y no se tendrán en cuenta en los siguientes cálculos, ya que aunque sí aportan radiación, ésta no va a ser muy significativa debido a que es una zona de poca concentración.

Estas zonas permiten datar su posición de las diferentes posiciones respecto a la regla que hay en el plano donde se proyecta el foco, mediante la simple observación visual directa de la imagen.

Una mejor visión global de donde se encuentran dichas variables se encuentra en la figura 3.9.

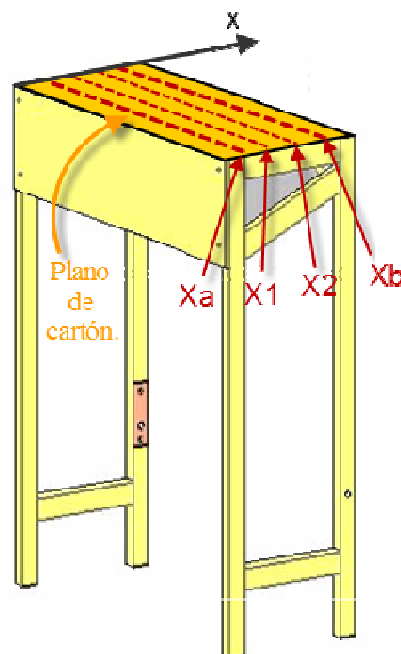


Fig. 3.9. Variables Xa , $X1$, $X2$, Xb .
(Fuente: Manual cocina PRIMROSE)

- **Xa :** es la más próxima a la posición del cocinero, marca el inicio de la zona focal.
- **$X1$:** siguiente variable continuando en la dirección x de la figura, marca el inicio de la zona de máxima concentración del foco.
- **$X2$:** siguiente variable continuando en la dirección x de la figura, marca el final de la zona de máxima concentración del foco.
- **Xb :** es la más lejana a la posición del cocinero, marca el final de la zona focal.

Estas variables siempre van a seguir la siguiente relación entre ellas, respecto a la dirección longitudinal del plano, dirección x:

$$Xa \leq X1 \leq X2 \leq Xb$$

Para medir dichas variables visualmente se ha dibujado una regla en el plano de cartón, su origen, punto 0, está alineado con la parte del cubículo invernadero más cercana a la posición del cocinero.

3.4. Tratamiento de imágenes con *Matlab* [15] y [16]

Para la localización y estudio de las diferentes variables implicadas en el movimiento y localización del foco se han tomado imágenes, para lo que se ha utilizado una cámara FUJIFILM FinePix S8000fd.

La luminosidad que puede captar la cámara no es la radiación total que puede llegar a encontrarse en el foco, ya que la radiación se transmite en longitudes de ondas, la mayor parte fuera del visible (rango de longitud de onda que puede captar la cámara). No obstante, el estudio de la caracterización del foco mediante imágenes en el visible sí nos aporta gran información y una aproximación bastante buena de cómo se distribuye la radiación en la formación del foco.

El esquema de la instalación de trabajo es el representado en la figura 3.10.

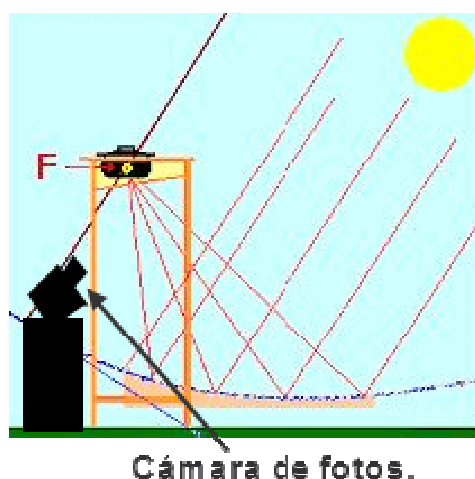


Fig. 3.10. Posición cámara de fotos.
(Fuente: Manual cocina PRIMROSE)

3.4.1. Imagen como nivel de grises

Se han estudiado las imágenes como una matriz de nivel de grises (NG), con valores comprendidos del 0 al 255, para ello se ha utilizado el programa

Matlab. Se ha pasado la imagen en color a una matriz en la que se encuentra el valor de NG que tiene cada uno de los píxeles de la imagen.

En *Matlab* una imagen a escala de grises es representada por medio de una matriz bidimensional de $m \times n$ elementos en donde n representa el numero de píxeles de ancho y m el numero de píxeles de largo. Cada elemento de la matriz de la imagen tiene un valor de 0 (negro) a 255 (blanco).

La foto es tratada como una matriz, los píxeles de la foto pasan a ser valores de nivel de gris. Cada píxel de la fotografía pasa a ser un elemento de la matriz con un valor de nivel de gris. Ver figura 3.11.

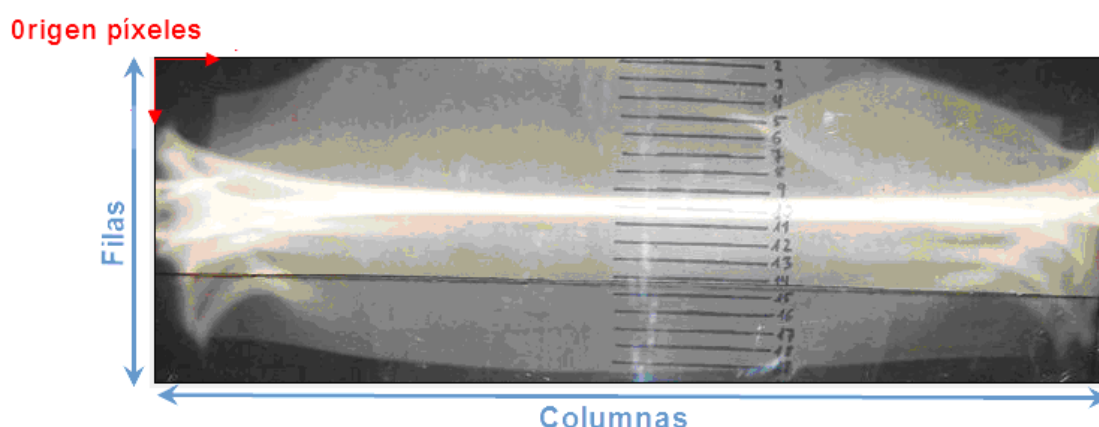


Fig. 3.11. Filas y Columnas de las fotografías.

Como ya se ha comentado, los bordes laterales del foco son generados por imperfecciones, estos añaden ruido a los datos obtenidos de las imágenes por lo que se opta por despreciarlos para el estudio. Por consiguiente, se recorta la imagen 1/6 por cada lado de su longitud transversal, ignorándose 1/6 de cada extremo de las columnas.

3.4.2. Error de percepción de luminosidad de la cámara

Para calcular el error que comete la cámara en la percepción de la luminosidad al tomar las fotografías, se van a utilizar tres fotografías de un objeto tomadas con el disparador automático.

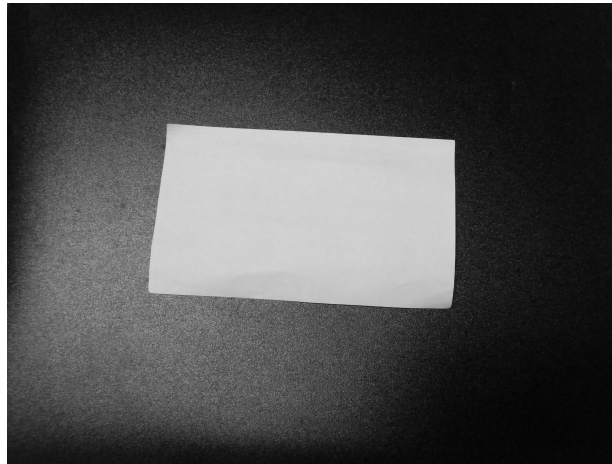


Fig. 3.12. Ejemplo imagen error de cámara.

La lectura de las imágenes y los cálculos se han realizado con *Matlab*, con el programa *errorcamara.m*. Tanto el programa como las fotografías se encuentran en los anexos, ver figura 3.12 para ver un ejemplo de la imagen en escala de grises sobre la que se ha calculado el error. El error se ha calculado de la siguiente manera:

Primero se han pasado las imágenes a una matriz de niveles de grises, posteriormente se han sumado los elementos de cada una de las tres matrices correspondientes a las tres imágenes y dividido cada una de las sumas por el número total de elementos de cada matriz, obteniendo el valor medio del nivel de grises de cada imagen.

Se calcula la media total de nivel de grises, con cada una de las medias de nivel de grises para cada imagen. Y se calcula el error del nivel de grises promedio de cada imagen (media imagen) respecto a la media total promedio del nivel de grises de las tres imágenes (media total):

$$error = \frac{media\ imagen - media\ total}{media\ total} \quad (20)$$

Los resultados son los siguientes:

Error Imagen 1	0.7%
Error Imagen 2	-0.2%
Error Imagen 3	-0.5%

Tabla. 3.1. Errores de las imágenes.

A la vista del error que comete la cámara respecto a la luminosidad cabe decir que este error no es significativo y se podrá despreciar.

3.4.3. Método del valor umbral

Los métodos del valor umbral son un grupo de algoritmos cuya finalidad es segmentar gráficos rasterizados, es decir, separar los objetos de una imagen que nos interese del resto. Con la ayuda de los métodos de valor umbral en las situaciones más sencillas, se puede decidir qué píxeles conforman los objetos que buscamos y qué píxeles son sólo el entorno de estos objetos. Este método es especialmente útil para separar el texto de un documento del fondo de la imagen (papel amarillento, con manchas y pequeñas arrugas por ejemplo) y así poder llevar a cabo el reconocimiento óptico de texto (OCR) con más garantías de obtener el texto correcto.

Como con todos los métodos de segmentación, se trata de asignar cada píxel a un cierto grupo, llamado comúnmente "segmento". La imagen que se debe segmentar, como cualquier gráfico rasterizado, está compuesta por valores numéricos (uno o más valores de color para cada píxel). La pertenencia de un píxel a un cierto segmento se decide mediante la comparación de su nivel de gris (u otro valor unidimensional) con un cierto valor umbral. El nivel de gris de un píxel equivale a su nivel de luminosidad; el resto de la información sobre el color no se tiene en cuenta.

Normalmente, los métodos del valor umbral "binarizan" la imagen de partida, es decir, se construyen dos segmentos: el fondo de la imagen y los objetos buscados. La asignación de un píxel a uno de los dos segmentos (0 y 1) se consigue comparando su nivel de gris g con un cierto valor umbral preestablecido t (en inglés *threshold*). La imagen final es muy sencilla de calcular ya que para cada píxel sólo hay que realizar una comparación numérica. La regla de cálculo correspondiente T_g es:

$$T_{gtotal}(g) = \begin{cases} 0 & \text{si } g < t \\ 1 & \text{si } g \geq t \end{cases} \quad (21)$$

Los métodos del valor umbral son métodos de segmentación completos, es decir, cada píxel pertenece obligatoriamente a un segmento y sólo uno. Otros métodos de segmentación permiten que los segmentos se solapen. Si en la imagen existen varios objetos con una luminosidad similar, con un mismo tono de gris, todos los píxeles que los componen pertenecerán al mismo segmento. En la práctica, siempre hay algún píxel que queda fuera del segmento aunque pertenezca al objeto, normalmente debido a ruidos en la imagen original. En función del valor umbral que se escoja el tamaño de los objetos irá oscilando.

4. RESULTADOS DE LA CARACTERIZACIÓN.

4.1. Formación del foco del concentrador semiparabólico

4.1.1 Importancia de las zonas del concentrador en la formación del foco.

En la observación directa de las imágenes del foco, como ya se ha comentado, se puede apreciar que existe una zona de máxima luminosidad y otras de menor luminosidad, se han creado las variables X_a , X_1 , X_2 y X_b para delimitarlas. Así, la zona de máxima luminosidad queda acotada por las variables X_1 y X_2 , y el foco en su totalidad queda acotado por las variables X_a y X_b .

En este apartado se va a tratar de justificar que la apariencia visual de la distribución de luminosidad en el foco tiene una base numérica y corrobora lo observado. Los cálculos se encuentran en el programa *partesfoco.m* contenido en los anexos.

Para el estudio, se ha procedido a tapar con cartulina cinco partes de igual área del espejo para analizar el comportamiento del foco cuando carece de ciertas partes del concentrador para su formación. Se analiza, así, el comportamiento del concentrador si tuviera diferentes áreas de reflexión.

A su vez, se ha calculado cuánta luminosidad es aportada por el concentrador respecto a la luminosidad del concentrador sin ninguna parte tapada. Como ya se ha comentado anteriormente, la luminosidad no es igual a la radiación que incide en el foco, pero es una buena aproximación de que partes del foco tienen mayor radiación respecto a otra parte del foco.

El espejo se ha dividido en cinco partes iguales según se muestra en la figura 4.1.

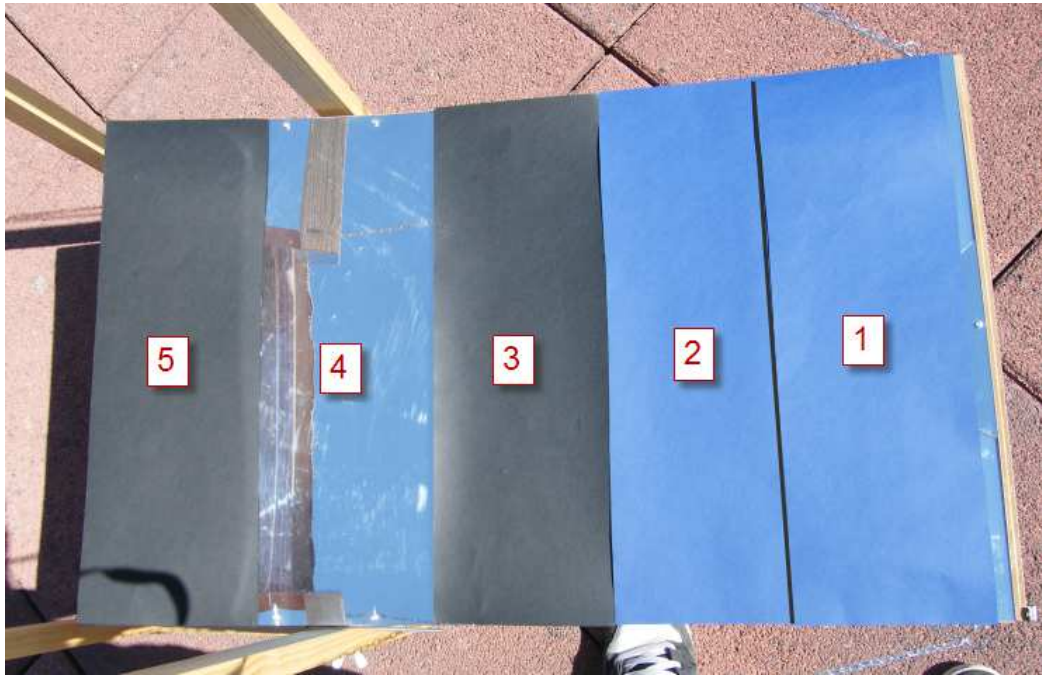


Fig. 4.1. Concentrador con las 5 áreas a tapar.

El foco, al irse tapando el concentrador, irá perdiendo luminosidad, y algunas zonas no se reflejarán respecto al foco con el concentrador sin tapar. En las figuras 4.2, 4.3, 4.4, 4.5, 4.6 y 4.7 se pueden observar los focos que se dan dependiendo de qué partes del concentrador estén tapadas.

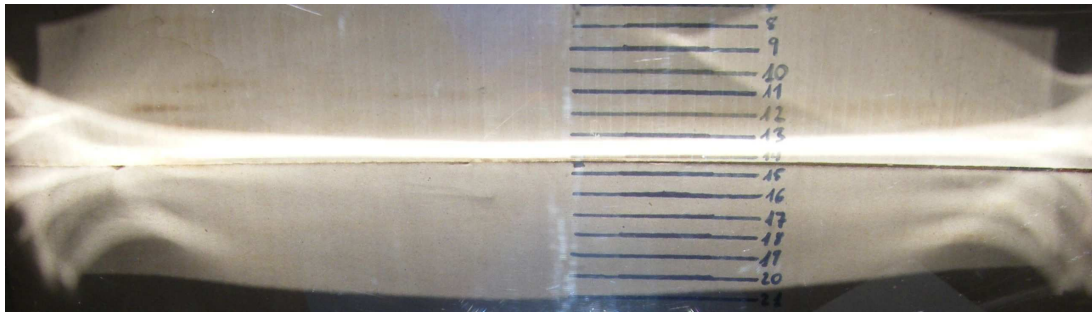


Fig. 4.2. Foco con el concentrador sin tapar.

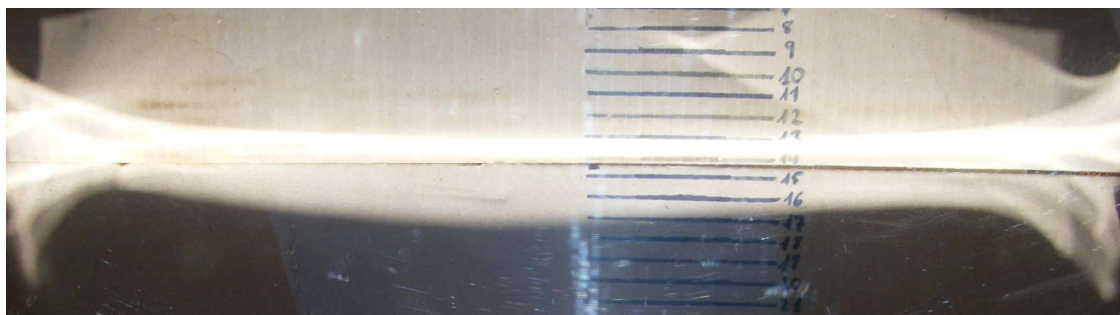


Fig. 4.3. Foco con el área 1 tapado.



Fig. 4.4. Foco con el área 1 y 2 tapado.



Fig. 4.5. Foco con el área 1,2 y 3 tapado.

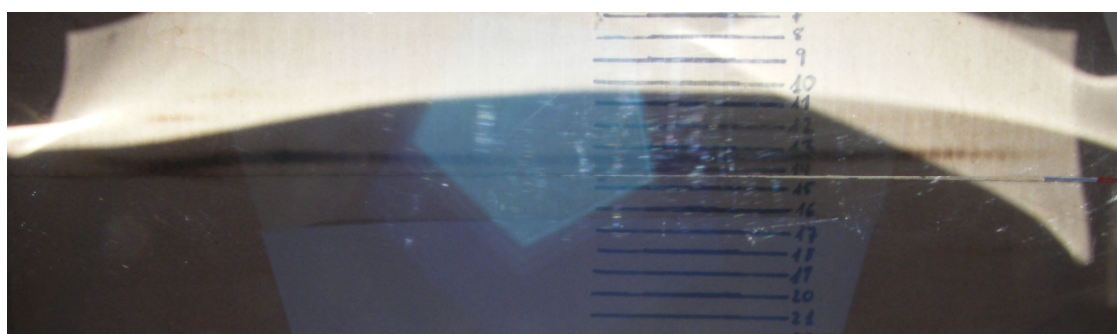


Fig. 4.6. Foco con el área 1, 2, 3 y 4 tapado.

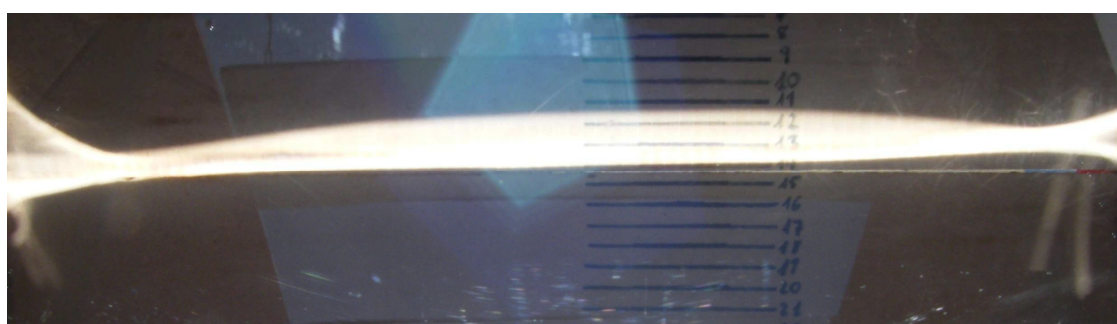


Fig. 4.7. Foco con el área 1, 2, 3 y 5 tapado.

En la tabla de la tabla 4.1 se recogen los resultados del porcentaje de luminosidad de cada una de las imágenes con área de concentrador tapada respecto a la luminosidad del foco que se forma cuando no está tapado el concentrador.

	Áreas tapadas	Porcentaje luminosidad
Área A	1	101%
Área B	1+2	93.4%
Área C	1+2+3	96.6%
Área D	1+2+3+4	73.8%
Área E	1+2+3+5	64%

Tabla. 4.1. Tabla porcentajes luminosidad.

Se ha nombrado cada situación con áreas tapadas en la tabla 4.1 con las letras A, B, C, D y E para una mejor referencia de las áreas que están tapadas.

En la tabla 4.1 se puede apreciar que el resultado del porcentaje de luminosidad cuando se tapa el área 1 es más de un 100%, aunque existe un pequeño error (por debajo del 1%) debido a la cámara, el hecho de que resulte un porcentaje mayor del 100% se debe a que al tomar las fotografías se han producido distintos efectos de reflexión sobre la lente de la cámara, de esta manera se puede asumir que aparezca este error. El mismo error sucede si se compara el porcentaje de luminosidad cuando están tapados el área B y el área C: en el área C se esperaría menor porcentaje de luminosidad que en el área B, puesto que el área C tiene más superficie de concentrador tapada.

Sin embargo, lo que es destacable es que el porcentaje de luminosidad se reduce significativamente al pasar del área C al D y también al E. Esto indica que las áreas del concentrador que más luminosidad aportan a la formación del foco son las áreas 4 y 5.

Es de destacar que solo con el área 4 sin tapar y el resto tapadas (Área E) se consiga mas del 60% de la luminosidad que se consigue con el concentrador totalmente destapado.

Como se aprecia al comparar la figura 4.6 con la figura 4.2, atendiendo a la regla dibujada en el plano de cartón, que el foco formado con el área E (figura 4.6, solo el área 4 sin tapar) se sitúa en el entorno de donde la figura 4.2 tiene la zona X1-X2, la de mayor luminosidad, esto quiere decir que un alto porcentaje de la luminosidad de dicha zona provendrá del área 4.

Conclusiones

Podemos concluir respecto a la importancia de las partes del concentrador que existen zonas del concentrador que reflejan mayor luminosidad que otras. Las partes del concentrador mas alejadas de la posición del cocinero son las que menos luminosidad aportan, por el contrario las zonas 4 y 5 aportan cerca de $\frac{3}{4}$ de la luminosidad total del foco.

Como ya se comento en el apartado 2.4.; la luminosidad que emite o refleja un cuerpo no es directamente proporcional a la energía que emite o refleja dicho cuerpo, esta luminosidad es proporcional a la radiación en el espectro visible de la luz pero no se puede inferir nada sobre el comportamiento de los demás rangos de longitud de onda. Sin embargo, el estudio del rango de longitud de onda de la luz en el visible es una buena primera aproximación para entender el comportamiento del resto del espectro utilizando técnicas de medidas solo en el espectro visible de la luz.

Se podría estudiar la posibilidad de reducir la longitud del concentrador conduciendo a un ahorro relativo de material y por consiguiente obteniendo una reducción en el precio de la cocina. Posiblemente este ahorro no sea tan significativo y compense fabricar la cocina con la longitud original del concentrador para conseguir mas radiación y para que cuando se cierre el panel concentrador quede la cocina recogida más robusta.

4.1.2. Localización de zonas Xa, X1, X2 y Xb mediante tratamiento de imágenes

Este estudio se realiza para confirmar que las fotos tomadas y clasificadas mediante la localización visual de Xa, X1, X2, Xb, son correctas y se apoyan en una percepción no solo visual sino numérica, de la existencia de las diferentes zonas que hay en el foco.

Se realiza un análisis de tres fotografías características del foco y se procede a analizar los valores medios, zonas de máximo nivel de grises y distribución del nivel de grises. El objetivo es conseguir determinar la localización de Xa, X1, X2, Xb en estas tres fotografías y comparar la localización visual realizada mediante la simple observación de la fotografía a través de la regla que existe en el plano donde se proyecta el foco.

Si la localización mediante tratamiento de imágenes coincide para estas tres fotografías con la localización visual, se considera que la observación visual directa es correcta y valida para localizar las variables Xa, X1, X2, Xb.

4.1.2.1 Formación del foco. Características.

Antes de analizar la localización del foco y de sus zonas, es necesario realizar un estudio de las características del foco para conocer los valores característicos de los niveles de grises y su distribución en el foco y las dimensiones generales del foco.

Se ha utilizado el programa generado en *Matlab, foco.m*, para el tratamiento de las imágenes, cálculos y la construcción de las diferentes gráficas que a

continuación se presentan. Las fotografías son denominadas del siguiente modo:

- FOTO 1: "03_08 13.30h 101°.jpg"

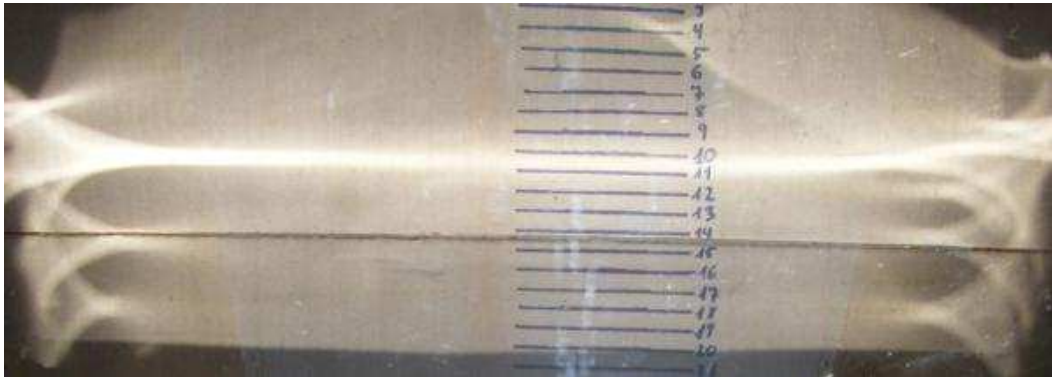


Fig. 4.8. FOTO 1: "03_08 13.30h 101°.jpg"

- FOTO 2: "03_08 12h 95°.jpg"



Fig. 4.9. FOTO 2: "03_08 12h 95°.jpg"

- FOTO 3: "03_08 14h 103°.jpg"

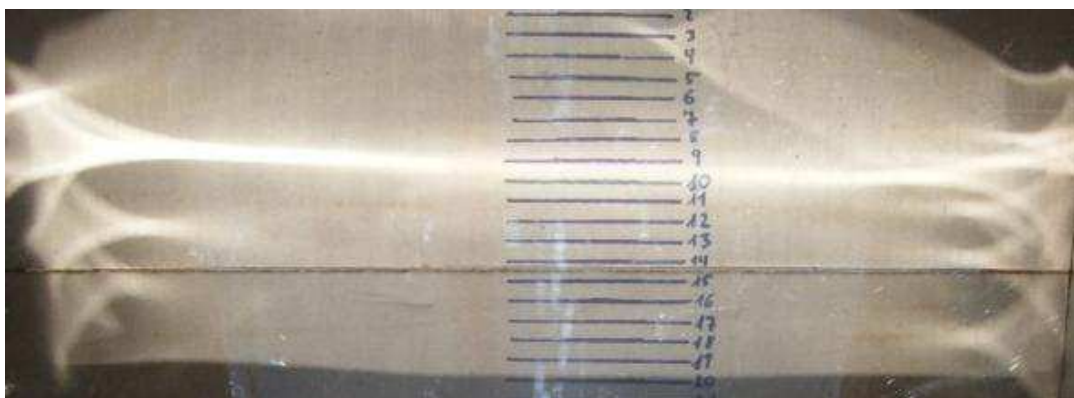


Fig. 4.10. FOTO 3: "03_08 14h 103°.jpg"

Como ya se ha comentado, los bordes laterales del foco son generados por imperfecciones que añaden ruido a los datos obtenidos de las imágenes, por lo

que se opta por despreciarlos para el estudio. Se ignoran 1/6 de cada extremo de las columnas. Ver figura 4.16. Se desecha, por tanto, la parte que queda a la izquierda del segmento 1 y la parte que queda a la derecha del segmento 5.

En la figuras 4.11, 4.12 y 4.13. se pueden observar los diferentes niveles de grises que se dan en las imágenes tomadas.

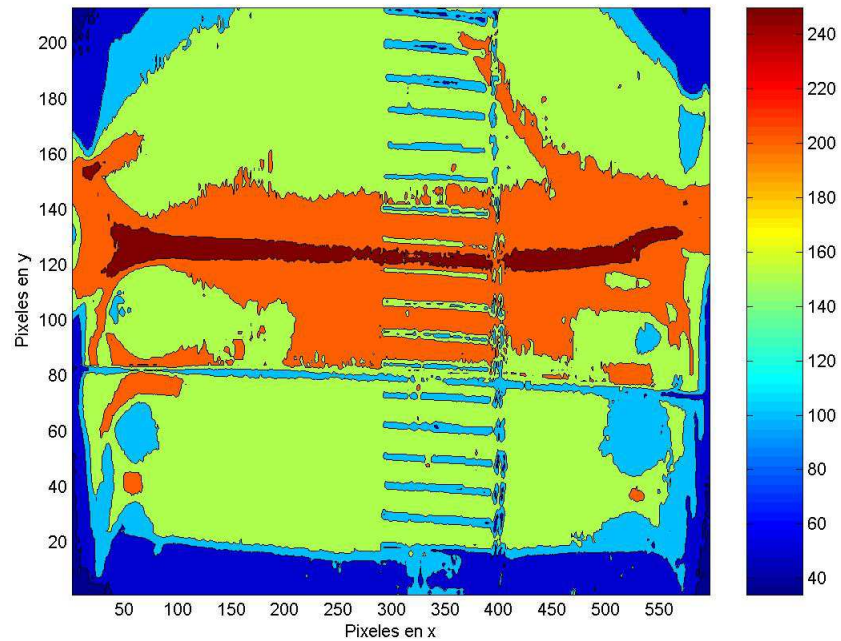


Fig. 4.11. Mapa de nivel de grises. FOTO1.

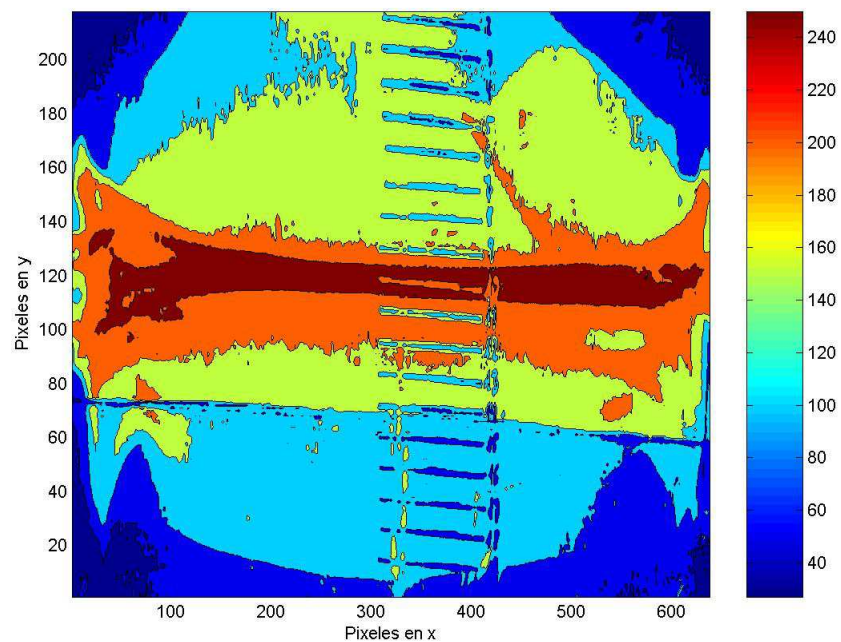


Fig. 4.12. Mapa de nivel de grises. FOTO2.

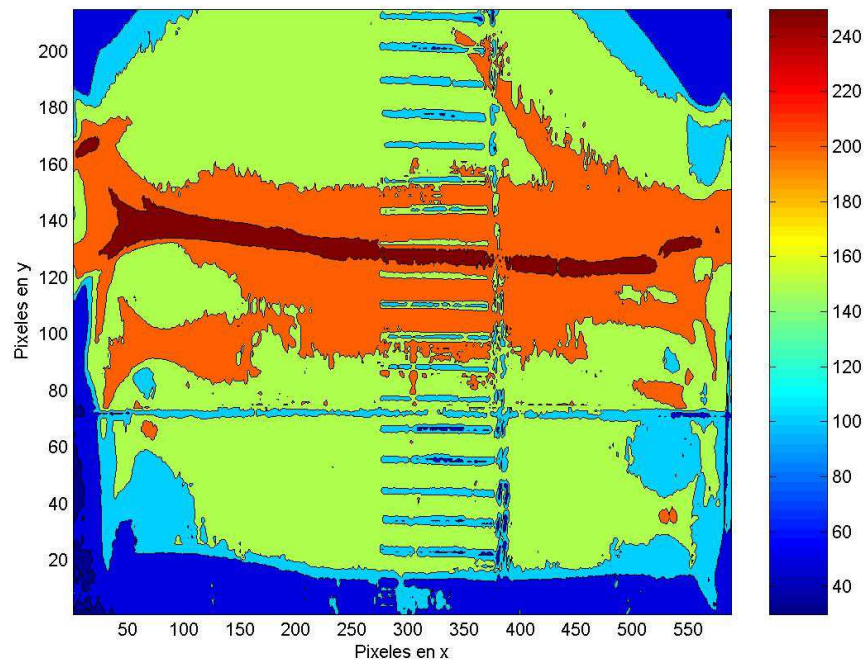


Fig. 4.13. Mapa de nivel de grises. FOTO3.

En la figura 4.14 se observa la media del nivel de gris que se obtiene sumando todos los valores de nivel de gris de cada fila y dividiéndolo por el número de columnas que hay en cada fotografía.

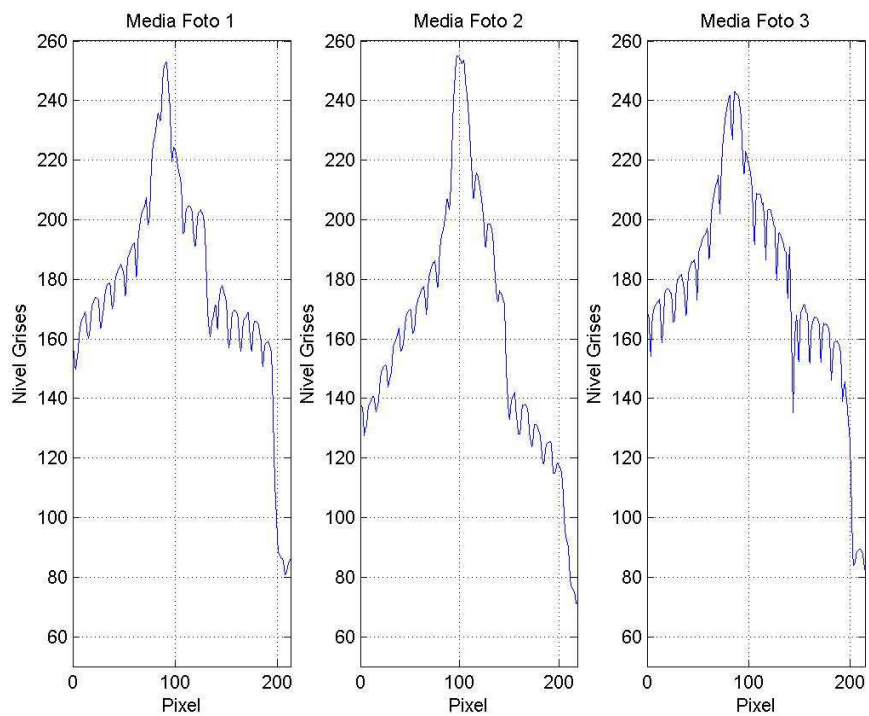


Fig. 4.14. Media de nivel de grises respecto a columnas.

En la figura 4.15 se observa la media del nivel de gris que se obtiene sumando todos los valores de nivel de gris de cada columna y dividiéndolo por el número de filas que hay en cada fotografía.

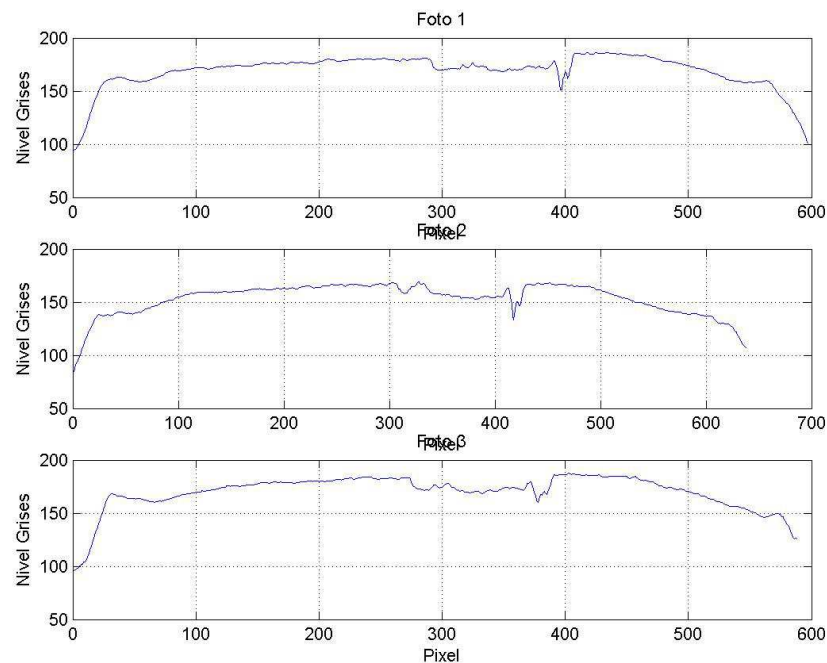


Fig. 4.15. Media de nivel de grises respecto a filas.

Como se observa en la figura 4.14, existen unos valores de nivel de grises muy superiores al resto, para ver la influencia en concreto de las diferentes partes que forman el foco se decide dividir la imagen a lo largo de 5 columnas equidistantes. Ver figura 4.16.

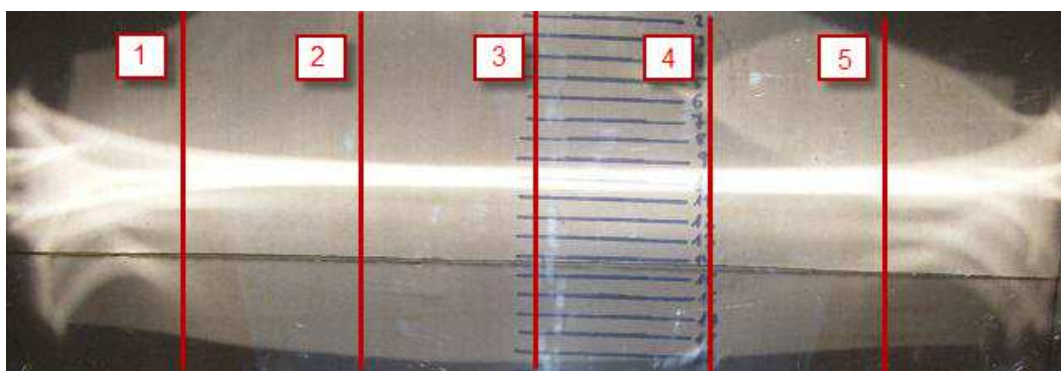


Fig. 4.16. Secciones en que se divide cada fotografía. Entre las secciones 1 y 5 se realizan los cálculos de las medias respecto a columnas y respecto a filas (Ejemplo para FOTO2).

En la figura 4.17. , 4.18 y 4.19 se pueden ver los niveles de grises de cada imagen que existen a lo largo de los píxeles de cada fila en cada una de las 5 columnas.

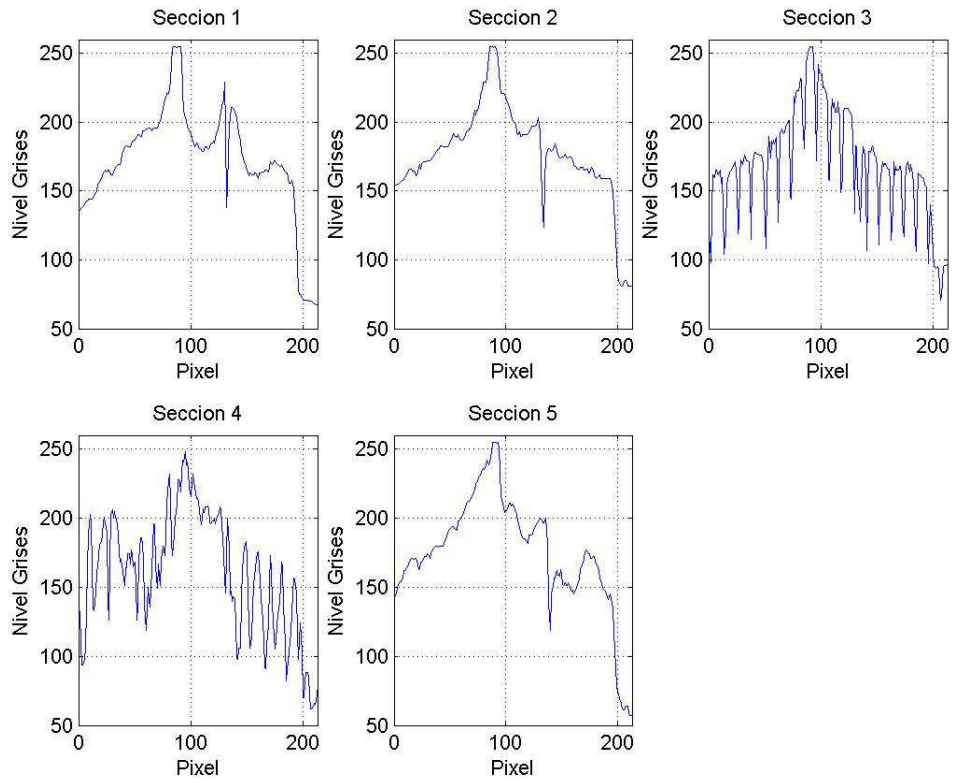


Fig. 4.17. Nivel de grises FOTO1 para las 5 secciones.

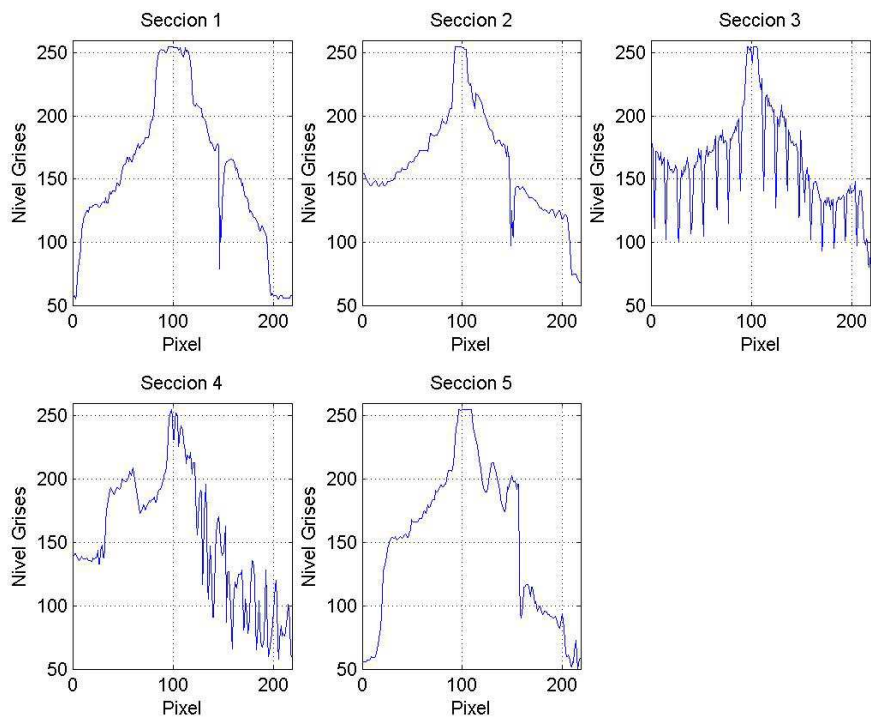


Fig. 4.18. Nivel de grises FOTO2 para las 5 secciones.

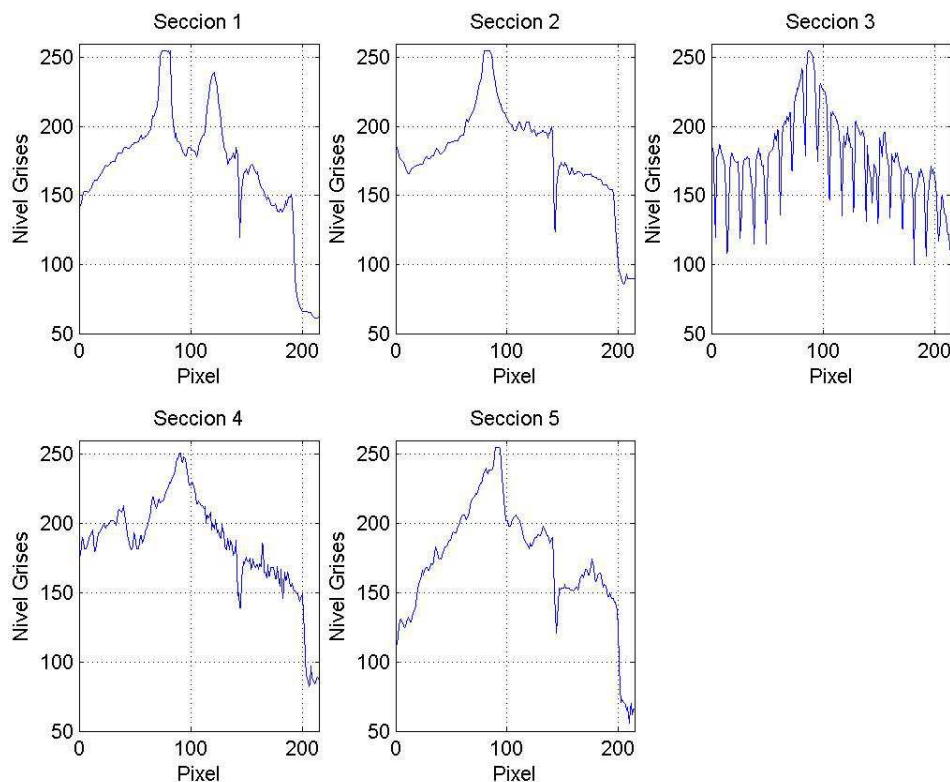


Fig. 4.19. Nivel de grises FOTO3 para las 5 secciones.

Se puede observar que en las figuras 4.17, 4.18 y 4.19 en la sección 3 se producen unas irregularidades en las gráficas, con descensos e incrementos muy pronunciados en poca distancia. Esto es debido al dibujo con rotulador de la regla en el plano de cartón en que se proyecta el foco.

A pesar de introducir bastante ruido en la gráfica, permite calcular los pixeles que forman un centímetro, y así poder calcular distancias reales conociendo los pixeles de diferencia. Para este cálculo se ha procedido de la siguiente forma:

Como la distancia entre cada marca de rotulador es un centímetro, se recogen de la sección 3 de las imágenes los puntos donde se registra el punto valle de las imperfecciones. Este punto valle se produce porque la marca de rotulador es de color oscuro, con lo que se registrará un descenso en el nivel de grises de la imagen. Observando la figura 4.20 se reconocen los puntos valle. Se ha realizado para la FOTO1 y FOTO2.

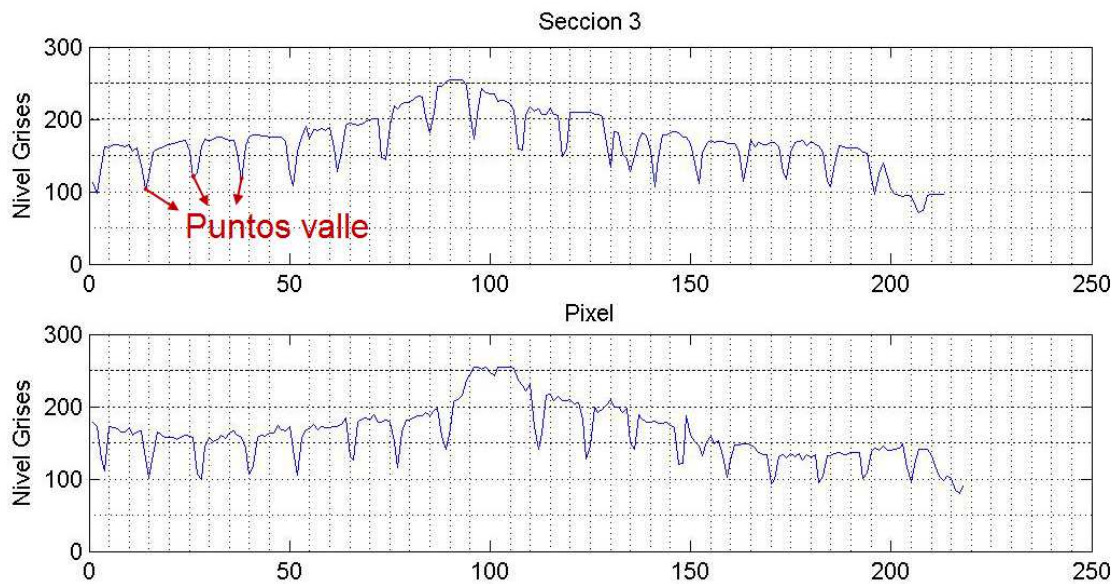


Fig. 4.20. Nivel de grises de la sección 3 de FOTO1 y FOTO2, respectivamente.

Una vez conocido en qué píxel se producen los puntos valle, se calcula la media entre las distancias de dos puntos valles consecutivos para cada foto y luego la media de la distancia de las dos fotografías. Este cálculo se encuentra en el programa *foco.m*, contenido en los anexos.

Finalmente se obtiene que la equivalencia entre píxeles y distancia en centímetros de:

$$1 \text{ cm} = 11,73 \text{ píxeles.}$$

Conclusiones

Observando las figuras 4.11, 4.12 y 4.13 se puede ver una zona marcada por un rojo oscuro, con la dirección transversal predominante, otra zona anaranjada y distintas zonas verdes y azuladas. El paso de las zonas verdes y azules a las zonas mas rojizas supone un aumento paulatino del orden del doble de nivel de grises, por lo que indica que en la zona de rojo oscuro se concentra la mayor luminosidad del foco, es decir esta zona es la de mayor interés pues en ella se va a concentrar la mayor parte de la radiación. Esto lo confirma la figura 4.14 donde se aprecia un mayor nivel de grises alrededor del píxel 100.

La zona de mayor nivel de grises es la contenida entre las variables denominadas como X1-X2. La zona verde es donde comienza a proyectarse el foco, pero no lo hace con la intensidad máxima. Esta zona verde está delimitada exteriormente por Xa y Xb, e interiormente por X1 y X2. En los apartados siguientes se estudiará dónde se localiza la zona X1-X2, ya que será la que mayor energía contenga y, conociendo su disposición, se podrá

optimizar la colocación del concentrador para lograr un calentamiento más eficaz.

En cuanto a la figura 4.15, se observa que existe un salto en el valor del nivel de grises en las partes extremas relativas a x , esto se debe a que en los bordes del foco se producen imperfecciones en la formación del foco lo que afecta a que en estas zonas no se alcance un nivel de grises tan alto como en la zona central del foco. La luminosidad, y por ello se entiende que la radiación también, se distribuyen bastante uniformemente a lo largo de la dirección transversal del foco, debido a la forma del concentrador semiparabólico, que es una parábola desarrollada a lo largo de la dirección transversal de la cocina. Este es el motivo por el que el recipiente donde se coloca la sustancia a calentar esté en el centro de la tapa del cubículo invernadero.

En las figuras 4.17, 4.18 y 4.19, en las que se representa el nivel de grises por secciones, se puede ver que en algunas secciones se produce un comportamiento irregular y no esperado del nivel de grises, lo cual puede deberse a reflejos del cubículo invernadero, irregularidades del cartón, como la marca de rotulador de la regla. Pero obviando estas irregularidades, se puede ver una zona de mayor nivel de grises que tiene una longitud de entre 10-15 píxeles. Se trata de la zona que en las figuras 4.11, 4.12 y 4.13 aparecen de color rojo oscuro y contiene el máximo de luminosidad.

En las figuras 4.17, 4.18 y 4.19, en las secciones 1 y 2 se observa que la gráfica se comporta siguiendo un aumento significativo y un descenso pronunciado alrededor del píxel 100, son los límites de la zona X1 y X2, donde se localiza la máxima concentración de luminosidad, se aprecian aumentos y descensos abruptos en cortos intervalos de píxeles, es decir derivadas con valores grandes, lo que indica la existencia de bordes en la zona X1-X2, en cuanto al nivel de grises.

También en las figuras 4.17, 4.18 y 4.19 se aprecia que hay un salto muy pronunciado en la zona de mayor nivel de píxeles en el eje de abscisas de las gráficas, entorno al píxel 200, existe una derivada muy pronunciada, lo que indica la existencia de un borde en dicha zona. Este salto de nivel de grises es lo que marca la existencia de Xb.

4.1.2.2. Localización de la zona X1-X2

Se ha visto la importancia de la zona X1-X2 para el calentamiento del foco, ya que en esta zona esta la mayor parte de la luminosidad del foco y en primera aproximación de la radiación que se encuentra en el foco.

En este apartado se va a estudiar dónde se localiza la zona X1-X2, en el plano cartón de la tapa del cubículo invernadero, para las tres fotografías del foco de las figuras 4.8, 4.9 y 4.10, mediante tratamiento de imágenes con *Matlab*. El programa utilizado para este cálculo es el programa *locX1X2.m*, contenido en los anexos. Los cálculos realizados son los siguientes.

Como ya se ha comentado, los bordes de los extremos transversales del foco aportan ruido a la imagen, por lo que se va a retirar de la imagen a estudiar 1/6 de cada extremo de la imagen, como lo expuesto en la figura 4.16.

El estudio tratará de determinar la posición de las variables X1 y X2 mediante el uso de valores umbrales para imágenes binarizadas.

El procedimiento consiste en estudiar dónde se localiza la zona X1-X2 en media. Para ello se definen tres posibles valores de nivel de grises que marquen el inicio de la zona X1-X2. Estos valores, a tenor de las gráficas del apartado anterior, estarán en torno a un nivel de grises superior a 230, 235 o 240, señalando estos valores los límites de la zona X1-X2, marcando la entrada y la salida de esta zona. Estos valores son los denominados valores umbrales explicados en el apartado 3.3.3, se va a estudiar para los tres valores umbrales. De esta manera, si se marca el umbral de la zona X1-X2 como los valores que estén por encima de 230, se obtendrá un ancho de la zona superior al obtenido si se marca el límite con el valor de 235 o 240 de nivel de grises. Ver figura 4.21.

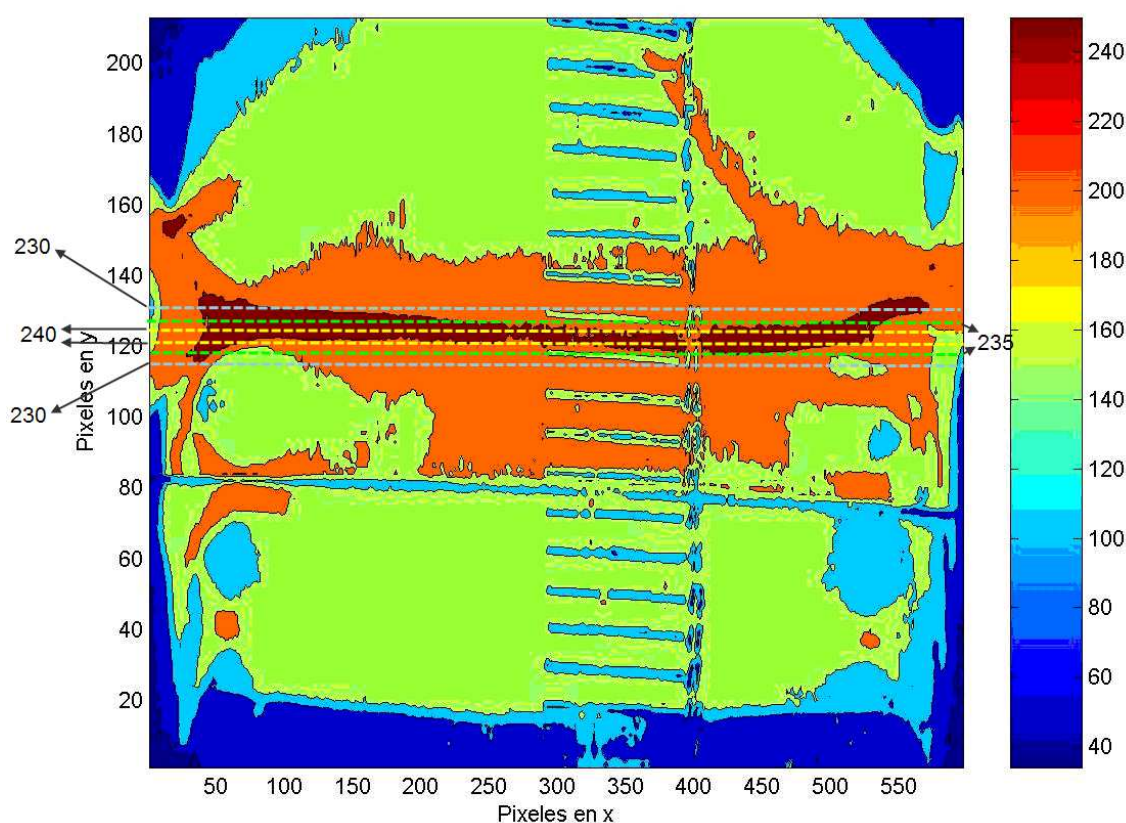


Fig. 4.21. Límites de la zona X1-X2 según el nivel de grises.

Para el estudio se ha transformado la imagen del foco en valores de nivel de grises y se ha creado una matriz de igual dimensión que la matriz de nivel de grises de la imagen con valores 1 o 0 en función de si el valor que tuviera el elemento de la matriz de nivel de grises fuera mayor o menor que el valor de nivel de grises que se ha establecido como umbral de la zona X1-X2; 230, 235 o 240. Así, si el valor de nivel de grises de la matriz es mayor que el valor que marca el límite, se introduce un 1 en la nueva matriz y, si no es superior, se introduce un 0, como marca la ecuación 21. Obteniendo una nueva matriz de unos y ceros que marcan los límites de la zona X1-X2. Esto se hace para los tres valores límites. El resultado es una matriz dividida en dos segmentos:

Para cada matriz binaria se calcula un vector cuyos elementos corresponden con la suma de todos los elementos de cada fila de las matrices. Un ejemplo de este vector que se crea para los tres umbrales de cada una de las tres matrices binarias se representa en la figura 4.22.

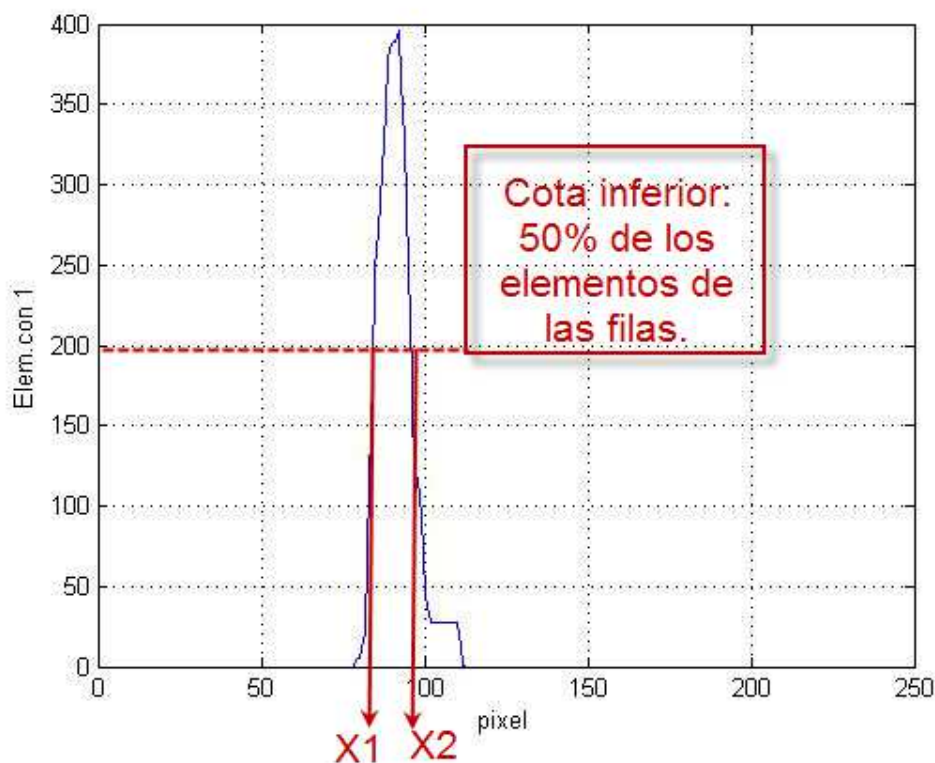


Fig. 4.22. Vector suma de elementos de cada fila para todas las columnas. FOTO1 para nivel umbral 230.

Para delimitar la zona X1-X2 se ha elegido como criterio que el borde de esta zona tiene que estar formado por, al menos, el 50% de los elementos de las filas de las matrices, es decir, tiene que haber un 1 en el 50% de los elementos de cada fila de la matriz binaria para que sea considerada esta fila como borde. El valor de píxel que marque este criterio será considerado como el valor promedio de la localización de X1 o X2. Estos cálculos los hace el programa

locX1X2.m, muestra el resultado de la posición en pixeles, respecto al origen del eje y de la imagen.

Estos son los resultados de la aplicación del programa *locX1X2.m* a cada imagen, ver tabla 4.2.

	Píxel zona X1-X2, según umbral.		Píxel zona X1-X2 en media.	Origen de la imagen. (cm)	Posición centro foco desde origen regla. (cm)
FOTO1	X1	230: 85	86.7	3	10.39
		235: 87			
		240: 88			
	X2	230: 95	94		11.01
		235: 94			
		240: 93			
FOTO2	X1	230: 94	94.4	2	10.05
		235: 94			
		240: 95			
	X2	230: 107	107		11.12
		235: 107			
		240: 107			
FOTO3	X1	230: 80	82.7	2	9.05
		235: 81			
		240: 87			
	X2	230: 93	92		9.84
		235: 92			
		240: 91			

Tabla 4.2. Tabla centro foco.

El cálculo de la posición del centro del foco desde el origen de la regla se realiza de la siguiente manera, por ejemplo para la FOTO1:

$$3cm + \frac{86.7}{11.73} cm = 10.39cm$$

Este número representa la distancia desde el origen de x, que aparece en la figura 3.8 y 3.9, hasta el centro del foco en promedio.

Conclusiones

Comparando los resultados obtenidos mediante tratamiento de imágenes y los obtenidos mediante observación directa de la fotografía, se ha obtenido la siguiente tabla 4.3.

		Medida visual directa. (cm)	Medida mediante trat. de imágenes. (cm)	Error
FOTO1	X1	10	10.39	-3.75%
	X2	11	11.01	-0.1%
FOTO2	X1	9	10.05	-10%
	X2	10.5	11.12	-5.6%
FOTO3	X1	9	9.05	-0.6%
	X2	10	9.84	1.62%

Tabla. 4.3. Comparación en medidas de X1 y X2.

Como puede verse en la tabla 4.3, los errores relativos se han calculado de la siguiente manera:

$$error = \frac{medida\ visual - medida\ trat}{medida\ trat} \quad (22)$$

Los errores obtenidos son relativamente bajos, por lo que se verifica que la medida visual directa de las variables X_a , X_1 , X_2 y X_b es correcta y puede hacerse simplemente observando la imagen del foco de la fotografía y relacionando la posición de dichas variables con la regla dibujada en el plano de cartón donde se proyecta el foco.

4.2. Efecto sobre el foco del ángulo α (ángulo de rotación del concentrador).

En el apartado 3.3.1, se define el ángulo α , ángulo de rotación del concentrador. Para el estudio de su influencia sobre la formación del foco, se han realizado medidas de las variables X_a , X_1 , X_2 y X_b para diferentes ángulos α , para una hora del día determinada, tomando distintas medidas de α a lo largo del día. Los cálculos y las gráficas se han realizado con el programa de Matlab: *angsolarcte.m*, este programa y las fotografías que se han tomado y han servido como fuente de datos están contenidas en los anexos.

El procedimiento consiste en tomar cuatro fotografías con un ángulo azimutal del sol y una altura solar constantes, es decir se toman cuatro fotografías en un

entorno de unos cinco minutos, en el que se considera ángulo azimutal del sol y una altura solar constantes, para distintos ángulos α . Mediante análisis visual de la imagen, con la ayuda de la regla que se ha dibujado en el plano de cartón, se identifica la posición de las variables X_a , X_1 , X_2 y X_b .

Así se obtiene el movimiento de las variables X_a , X_1 , X_2 y X_b a lo largo de la dirección longitudinal del plano donde se proyecta el foco, respecto a la variación del ángulo de rotación del concentrador, α . La cocina en todo momento está alineada correctamente con el sol respecto al ángulo azimutal, por lo que este ángulo no se analiza en el estudio.

En la tabla 4.4 se encuentra el ángulo θ (Altura solar) de cada hora del día y su simétrica respecto de las 12 hora solar, en las que se han hecho las medidas. El cálculo de este ángulo se realiza con las ecuaciones de los apartados. 2.2.2, 2.2.3 y 2.2.4. Viene incluido en el programa *angsolarcte.m*.

Hora solar	θ (Altura solar)
8:40h/15:20h	41.44°
9:40h/14:20h	52.22°
10:20h/13:40h	58.56°
11:10h/12:50h	64.78°
11:20h/12:40h	65.59°

Tabla 4.4. Altura solar.

Para una hora determinada del día la gráfica que se obtiene es la de la figura 4.23.

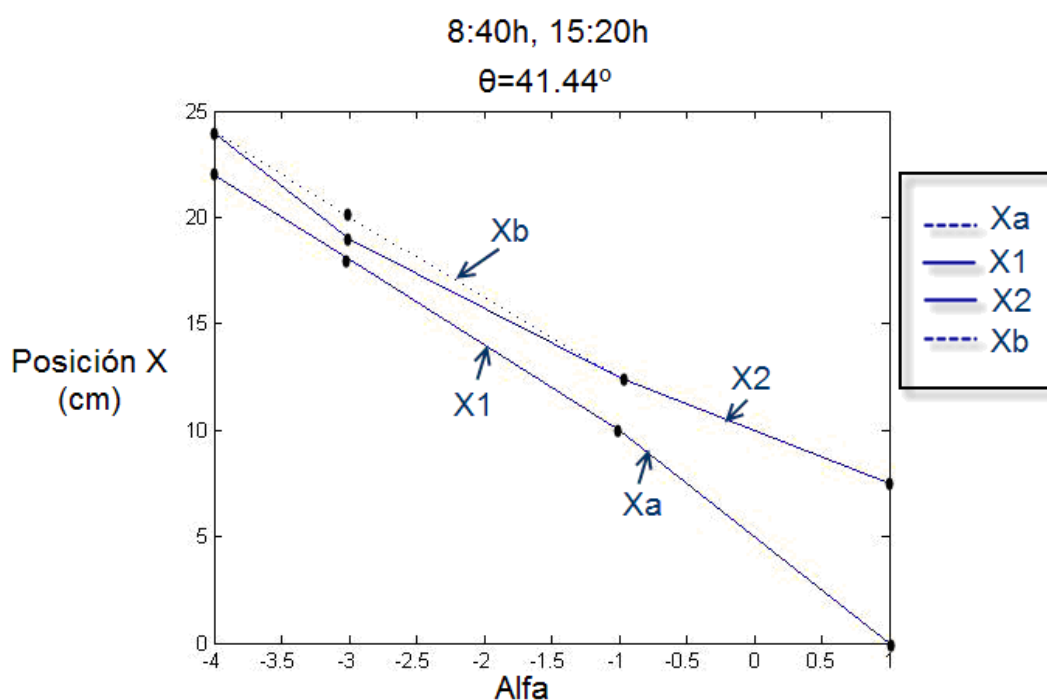


Fig. 4.23. X_a , X_1 , X_2 y X_b en función de α , para las 8:40h y 15:20h, hora solar.

Cada gráfica es igual para dos horas del día, simétricas respecto al mediodía solar y con igual θ (altura solar), cuando el sol está en su cenit, ya que el ángulo que forme el sol respecto a la cocina será el mismo. Esta gráfica y las siguientes están realizadas con datos del día 3 de Agosto de 2011, en Leganés (latitud = 40,19° N).

Hay que recordar que en función de la variable x , dirección longitudinal del plano donde se proyecta el foco, siempre se cumple: $Xa \leq X1 \leq X2 \leq Xb$.

La variable **Xa** se dibuja con línea discontinua y, moviéndose en la gráfica desde los valores menores de Pos. Foco hasta los valores mayores, es la primera que se encuentra. En muchas ocasiones Xa tendrá el mismo valor que X1.

La variable **X1** se dibuja con línea continua y es la siguiente que se encuentra yendo de valores menores a valores mayores en el eje de ordenadas.

La variable **X2** se dibuja con línea continua y es la siguiente que se encuentra. Por último, la variable **Xb** se dibuja con línea discontinua, es la última que se encuentra yendo de valores menores a valores mayores en el eje y.

La gráfica con todas las horas en que se han medido las variables del foco en función del ángulo de rotación, α , se encuentra en la figura 4.24, en ella los datos aparecen muy comprimidos debido a que se realizaron más número de medidas cerca de las 12 hora solar. Cada medida está representada con su altura solar.

La zona óptima del foco se establece como la distancia del ancho del recipiente donde se cocina en su parte inferior. Según el manual de instrucciones se recomienda que el foco incida en la parte inferior de dicho recipiente.

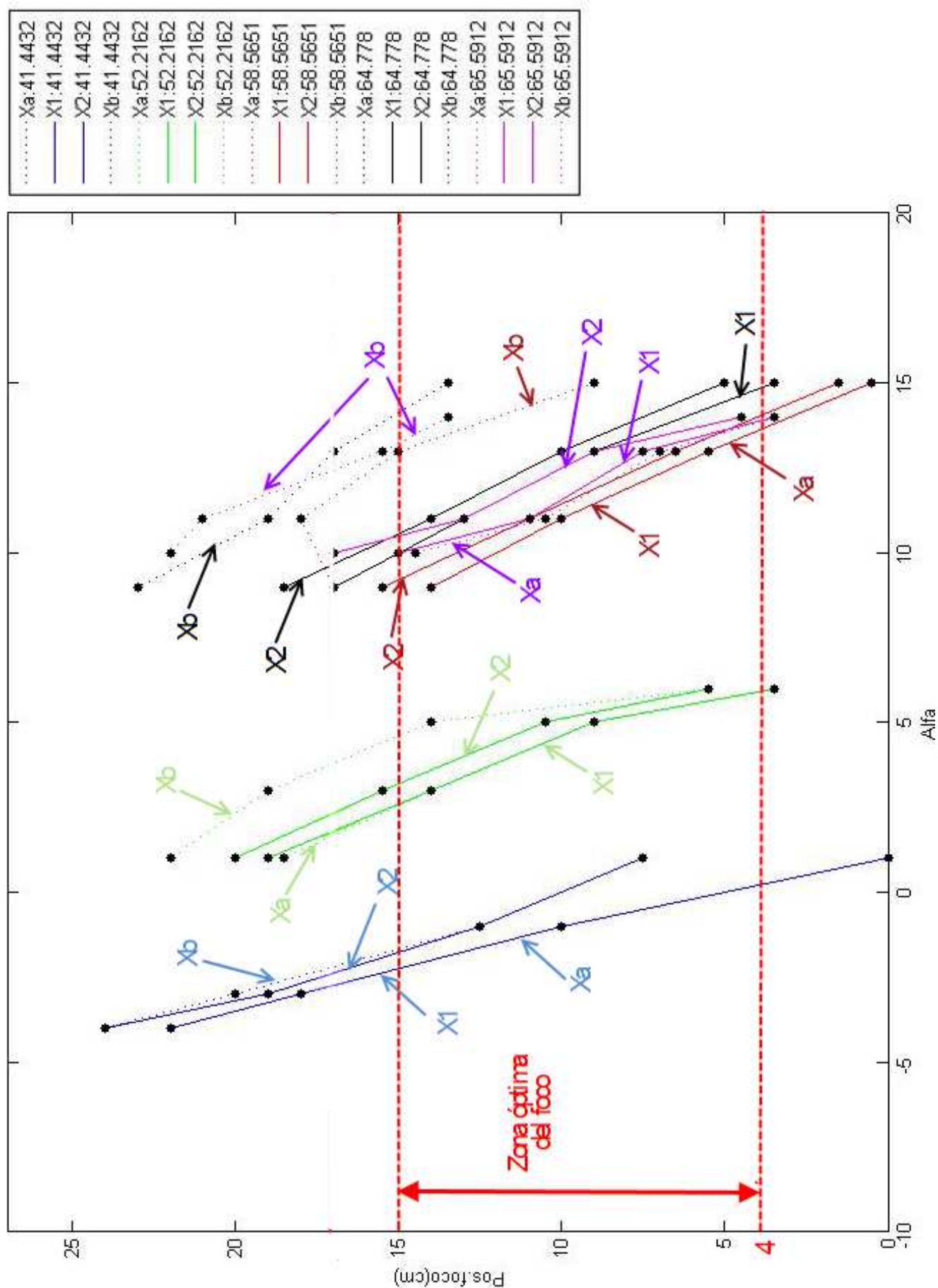


Fig. 4.24. Posición del foco de todas las medidas.

Conclusiones

Analizando las gráficas de forma individualizada para cada par de horas (para cada ángulo azimut y altura solar) se puede ver que reduciendo el ángulo α , ver apartado 3.3.1, el foco se mueve hacia posiciones mas alejadas del origen de x, más alejadas de la posición del cocinero, ver figura 2.13, es decir, si para una posición del sol dada, el concentrador hay que rotarlo en el sentido de las agujas del reloj para llevar el foco hacia posiciones alejadas del origen de x, si se rota el concentrador en sentido contrario a las agujas del reloj el foco se desplaza hacia el origen de x. Ver figuras 4.25 y 4.26.

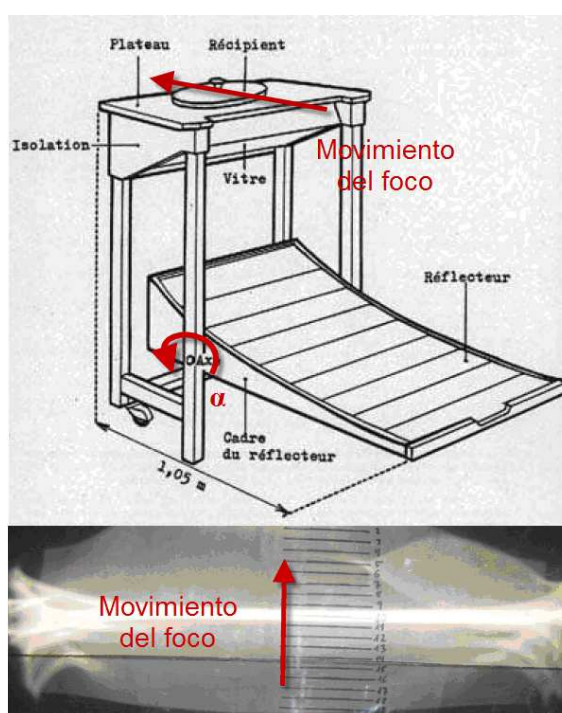


Fig. 4.25. Movimiento foco, con ángulo α antihorario.

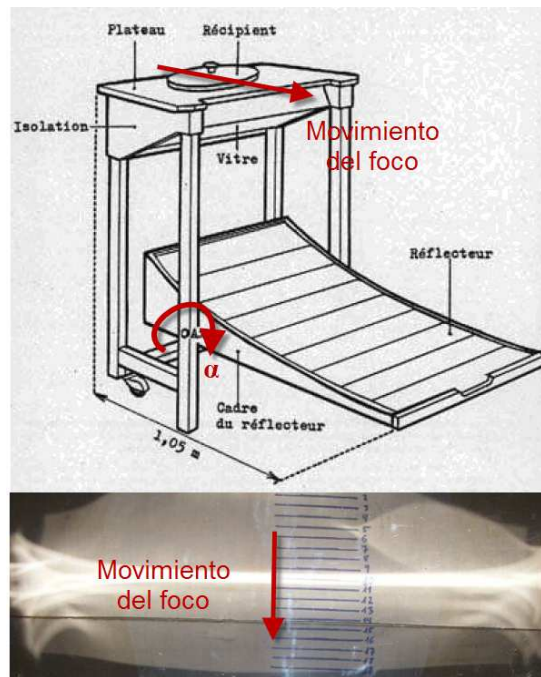


Fig. 4.26. Movimiento foco, con ángulo α horario.

Si analizamos la relación entre las distintas gráficas para cada posición del sol cada hora, pretendiendo situar el foco en el entorno del plano donde se coloca el recipiente para cocinar, se puede observar cómo tienen un paralelismo pronunciado. Su tendencia, según se mueva el sol a lo largo del día, es a desplazarse hacia valores de α mayores, hasta que se alcanza el mediodía, 12h hora solar, entonces vuelven por un camino simétrico, al igual que el sol, hacia valores más pequeños de α .

Según esto, el comportamiento del foco a lo largo del tiempo si se mantuviera el ángulo α constante sería el de ir aumentando el valor de las variables X_a , X_1 , X_2 y X_b a lo largo de x , moviéndose hacia posiciones más alejadas del cocinero.

Se recomienda, según el manual de instrucciones, que la rotación del concentrador sea tal que el foco se posicione con su parte más cercana al cocinero, la denominada variable X_1 , en la zona del recipiente más cercana al cocinero, de esta forma hay que revisar la rotación del concentrador menos veces. Esto sucede cuando se cocina en horas inferiores al mediodía solar, 12h solar, ya que con el movimiento del sol, el foco, que inicialmente está posicionado en x pequeñas, se desplazará a valores superiores de x , hasta que la variable X_2 salga de la zona óptima, momento en el que hay que corregir el ángulo α , para volver a llevar la variable X_1 del foco a la parte trasera del recipiente de cocción. Se puede dejar unos minutos más con parte del foco incidiendo en el lateral del recipiente, no es recomendable, como se verá en el apartado 4.4, pero permite que el cambio de ángulo α no sea tan estricto en el tiempo.

Para horas superiores al mediodía solar el comportamiento será el contrario, el ángulo α , deberá ser tal que la variable X2 del foco se encuentre en la zona del recipiente más alejada del cocinero, para que con el movimiento del sol, con α constante, el foco se desplace hacia zonas del recipiente mas cercanas al cocinero. En este caso en el momento en que X1 salga de la zona óptima hay que realizar el cambio de ángulo α , ya que parte del foco dejará de incidir en la base del recipiente e incidirá en el papel reflectante del invernadero.

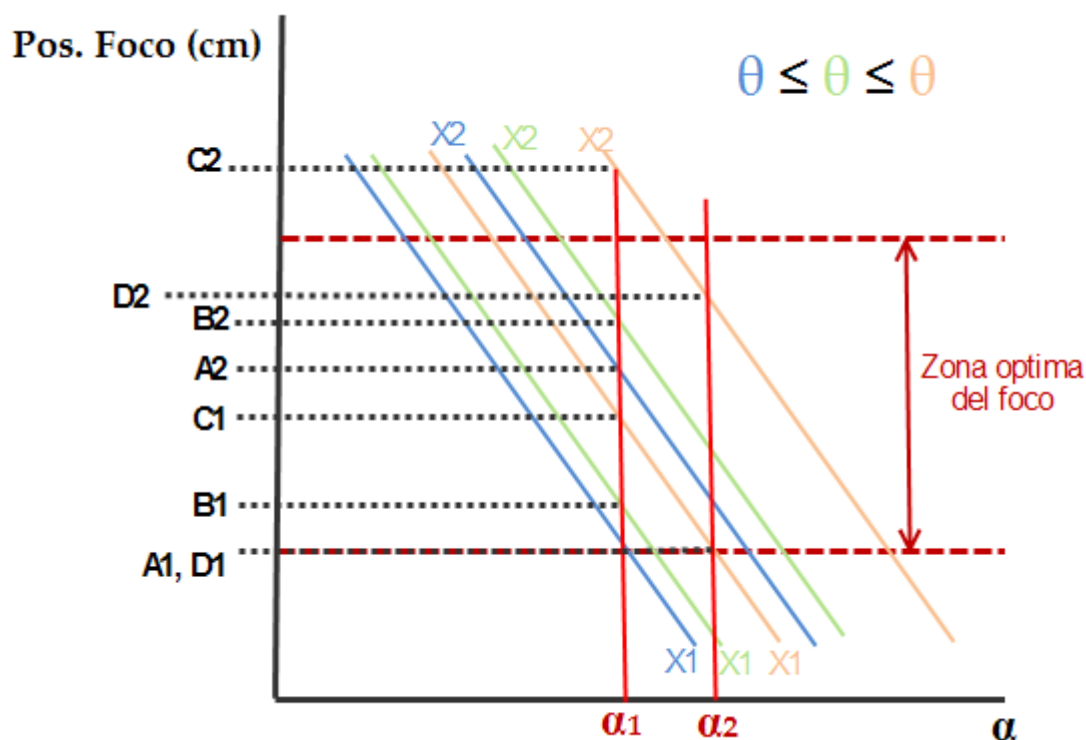


Fig. 4.27. Esquema actuación ángulo α del concentrador.

En la figura 4.27 se puede ver, esquemáticamente, el movimiento de la posición del foco en función del ángulo α : cómo se comporta el foco, para un ángulo α constante, cuando se suceden tres alturas solares. Para cada una están representadas la tendencia de las variables X1 y X2.

El esquema está realizado para alturas solares anteriores al mediodía solar. La gráfica de la figura 4.24 tiene como datos los de un mismo día tomados de forma continua, por lo que no existen, para diferentes alturas solares, un mismo ángulo α , mientras que en el esquema se ha supuesto conocidos el comportamiento de las variables X1 y X2 para las tres alturas solares, solo se cuenta con estas variables para facilitar la explicación.

Para conocer con precisión cuál sería el ángulo α óptimo, habría que conocer el movimiento de X1 y X2 de forma continua a lo largo de todas las alturas

solares. Para la explicación se han supuesto conocidas tres alturas solares cercanas y sucesivas.

Cuando el sol tiene la altura solar azul y el concentrador con un ángulo α_1 , el foco se encuentra entre las posiciones A1 y A2. Pasado un cierto tiempo la altura solar será la marcada en color verde y para un ángulo α_1 , el foco quedará delimitado entre la posición B1 y B2. Cuando se alcanza la tercera altura solar, marcada en color naranja, el foco queda posicionado entre C1 y C2, se puede ver que C2 queda fuera de la zona óptima donde se debe proyectar el foco, por lo que habría que cambiar el ángulo de rotación del concentrador a un ángulo α_2 , la altura solar seguiría siendo la misma, θ naranja, volviendo el foco a proyectarse dentro de la zona óptima en las posiciones D1 y D2.

4.3. Efecto sobre el foco del ángulo θ (Altura Solar)

En este apartado se va tratar el comportamiento del foco con la variación de la altura solar. Para ello, se han tomado fotografías del foco para distintas alturas solares a lo largo del día, las fotografías han sido realizadas el día 4 de Agosto de 2011 en Leganés (latitud = 40,19°N).

Se han realizado cuatro fotografías del foco separadas por un tiempo de 15 minutos con un ángulo α constante, para tres posiciones de α . Observando las imágenes del foco mediante identificación de la luminosidad de las distintas partes del foco, se extrae la evolución de las variables X_a , X_1 , X_2 y X_b en función de la altura solar, θ . Las fotografías están tomadas indistintamente antes del cenit del sol y después, ya que al ser la altura solar simétrica a lo largo del día respecto al momento del cenit, los datos de la posición sacados de la fotografía sirven para dos horas solares simétricas respecto al cenit.

En la toma de las fotografías se ha mantenido el ángulo α constante hasta que el foco, debido a la variación de la altura solar, se desplazaba hasta zonas que no están próximas a la zona del recipiente a calentar, entonces se ha rotado el concentrador, variando α , hasta que el foco se encontraba de nuevo en una zona de interés.

Los cálculos y gráficas obtenidas de este estudio se han realizado con *Matlab*, con el programa *angconcte.m*, tanto el programa como las fotografías de donde se han obtenidos los datos del estudio se encuentran en los anexos.

Hay que recordar que siempre se cumple: $X_a \leq X_1 \leq X_2 \leq X_b$.

La variable **Xa** se dibuja con línea discontinua y moviéndose en la grafica desde los valores menores de Pos. Foco hasta valores mayores, es la primera que se encuentra. En muchas ocasiones Xa tendrá el mismo valor que X1.

La variable **X1** se dibuja con línea continua y es la siguiente que se encuentra yendo de valores menores a valores mayores en el eje de ordenadas.

La variable **X2** se dibuja con línea continua y es la siguiente que se encuentra.

Por ultimo la variable **Xb** se dibuja con línea discontinua, es la ultima que se encuentra yendo de valores menores a valores mayores en el eje y.

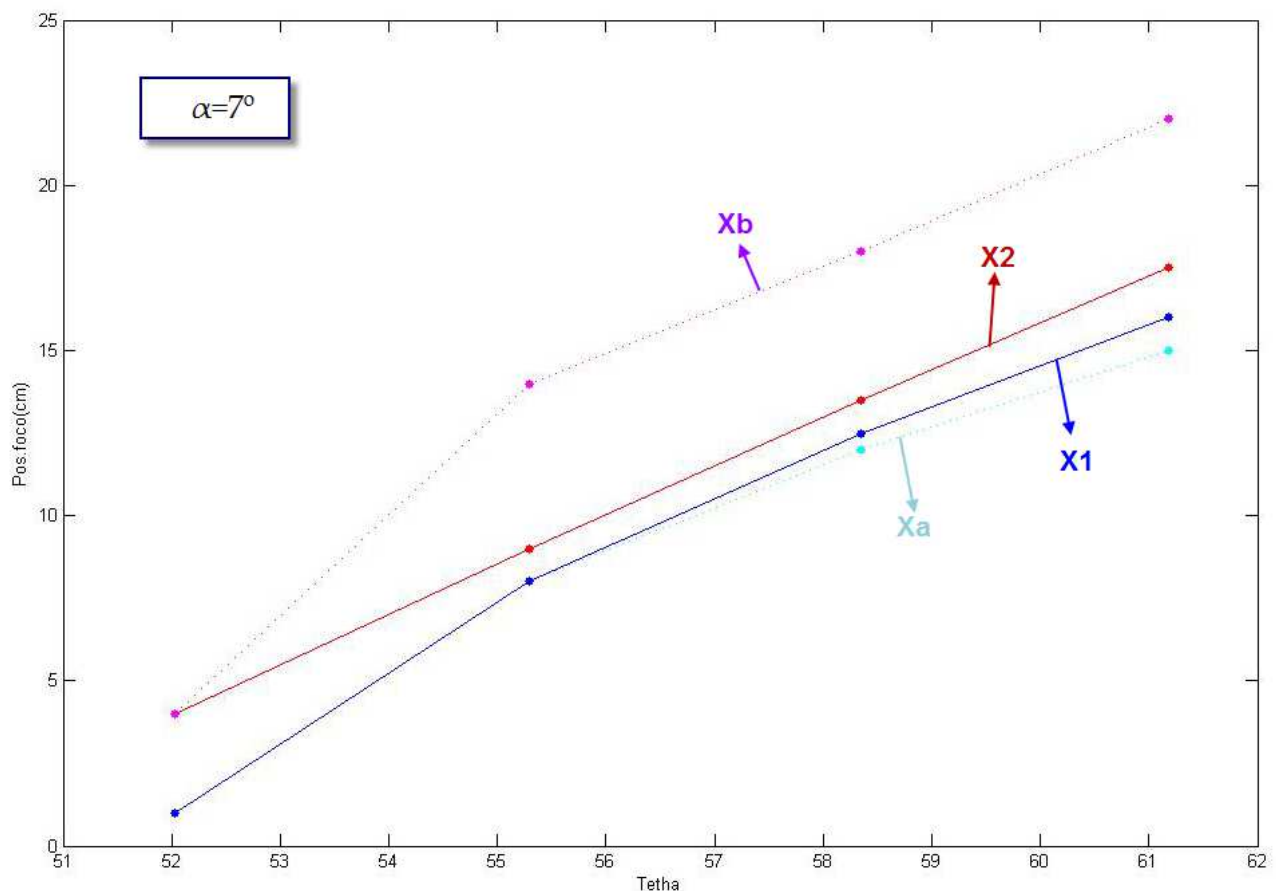


Fig. 4.28. Variables Xa, X1,X2 y Xb para un $\alpha=7^\circ$.

En la gráfica de la figura 4.28 se ven las variables Xa, X1, X2 y Xb variables Xa, X1, X2 y Xb desde el ángulo $\theta=52^\circ$ hasta $\theta=61^\circ$, para un ángulo $\alpha=7^\circ$, en el eje de ordenadas se encuentra la posición del foco, el valor en centímetros de la dirección x, ver figuras 3.8 y 3.9. Esta gráfica es un ejemplo del resultado de las cuatro fotografías que se han hecho para cada ángulo α .

En las gráficas de las figuras 4.29 se muestra la posición de las variables Xa, X1, X2 y Xb, en función de la altura solar. Para una comprensión más intuitiva se dibuja la gráfica de la figura 4.30 que muestra la posición de las variables Xa, X1, X2 y Xb, en función de la hora solar.

En estas gráficas aparecen datos para unos ciertos valores de ángulo α a distintas alturas solares, por lo que no se puede establecer el comportamiento continuo de del foco, pero si se puede extraer la tendencia del movimiento del foco.

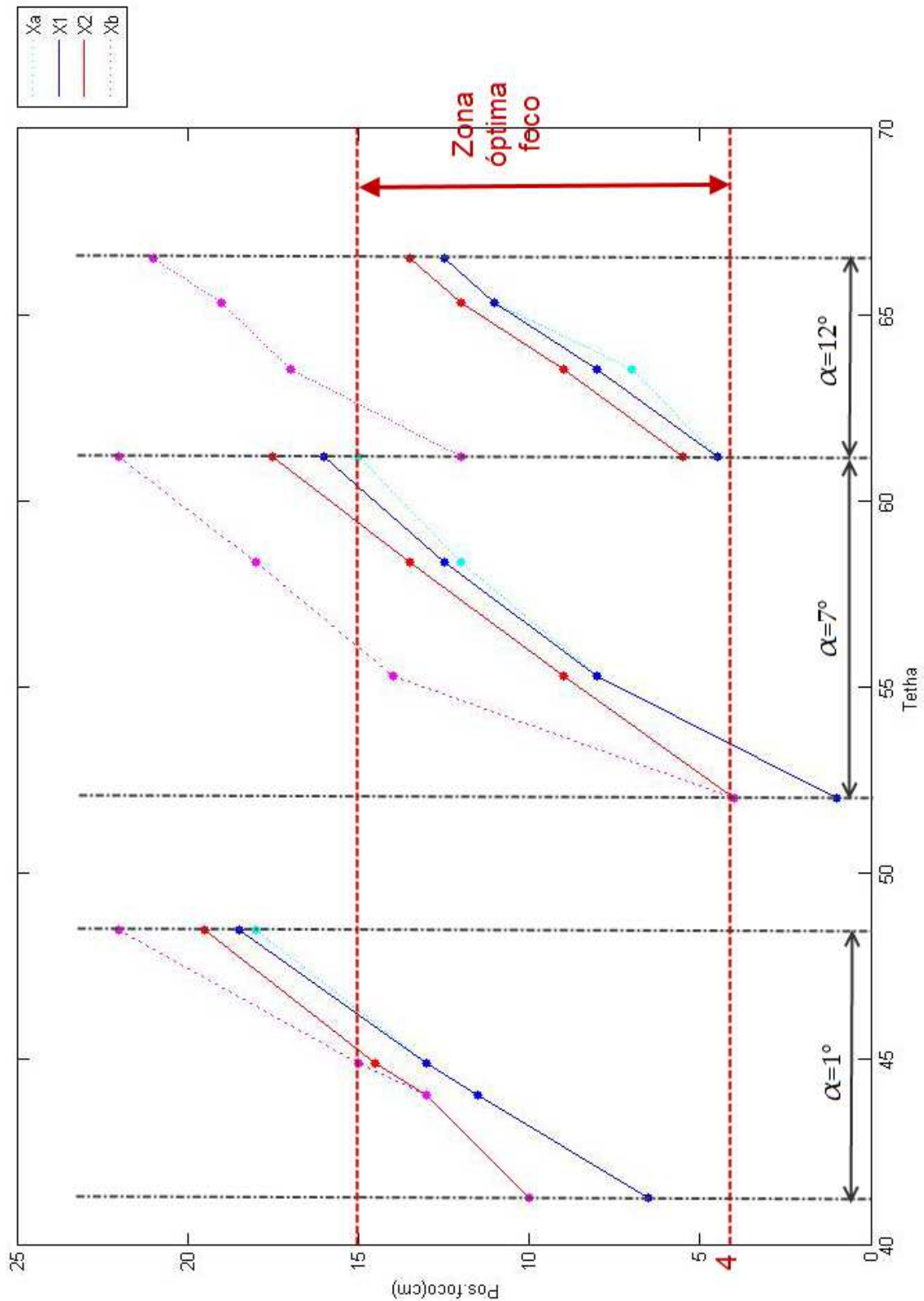


Fig. 4.29. Posición variables X_a , X_1 , X_2 y X_b para 3 ángulos α , en función de la altura solar, θ .

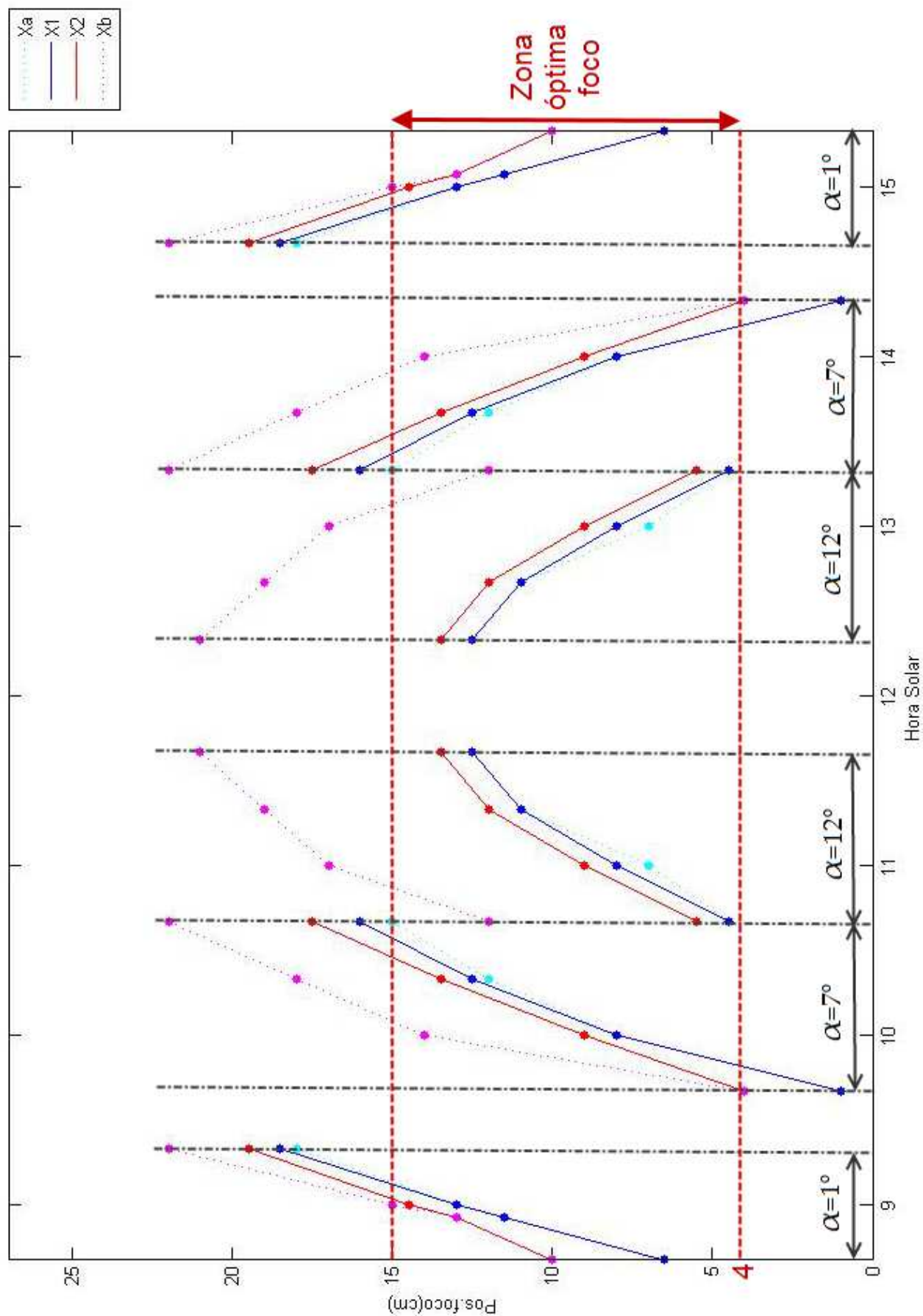


Fig. 4.30. Posición variables X_a , X_1 , X_2 y X_b para 3 ángulos α , en función de la hora solar.

Conclusiones

Analizando las gráficas individuales para cada α constante, se puede ver que las variables X_a , X_1 , X_2 y X_b aumentan en la dirección x del plano donde se proyecta el foco, ver figura 3.8 y 3.9, cuando el sol se mueve hacia su cenit, siendo al contrario cuando el sol se aleja de su cenit, entonces las variables X_a , X_1 , X_2 y X_b se mueven hacia el origen de la dirección x . Es por esto necesario tener que aumentar el ángulo α conforme aumenta la altura solar para que el foco se posicione dentro de la zona óptima del foco, de igual manera al descender la altura solar hay que reducir el ángulo α .

La variable X_a se encuentra siempre muy cercana a X_1 , mientras que la variable X_b , se va alejando de X_2 al acercarse la altura solar a la altura cenit del sol.

Observando las gráficas de las figura 4.29, se puede ver un paralelismo en el comportamiento de las variables del foco. Cuando la altura solar se aproxima al cenit, se puede observar en la figura 4.29, que solo la variable X_b rebasa la zona óptima del foco, las demás variables no llegan a alcanzar, para esos valores de altura solar una posición tan alejada.

Este comportamiento es de resaltar ya que en las fotografías tomadas se revela que la zona X_1 - X_2 , zona de máxima concentración del foco, no se forma con la misma intensidad lumínica, lo que indica que no aporta tanta radiación como en otros casos.

Con la dispersión descrita de la variable X_b , podría decirse que parte de la radiación que iba a parar, para otras alturas solares, a la zona X_1 - X_2 lo haga, en alturas solares cercanas al cenit, dispersándose en la zona de X_2 - X_b lo que sumado al alejamiento de X_b a X_2 provocaría una pérdida en la concentración de la radiación proveniente del espejo. Además, cuando se alcanzan estas alturas solares cercanas al cenit, se producen problemas con sombras de la propia cocina, del cubículo invernadero, lo que contribuye a un descenso de la radiación que puede incidir en la base del recipiente.

Hay que recordar que esta cocina ha sido fabricada en Alemania, donde no se alcanzan alturas solares tan altas como las que se alcanzan en España, para un mismo día, y pueden no haberse tenido en cuenta estos problemas en la proyección del foco.

La manera de actuar sobre el concentrador para buscar la posición óptima del foco se explica con la figura 4.31 con un esquema teórico. En ella se pueden ver tres posiciones del ángulo de rotación del concentrador, α , para distintas alturas solares, a diferencia del esquema de la figura 4.31 respecto a la figura 4.29, con medidas experimentales. En dicha figura 4.31 se representa el

comportamiento de las variables $X1$ y $X2$ a lo largo de diferentes alturas solares.

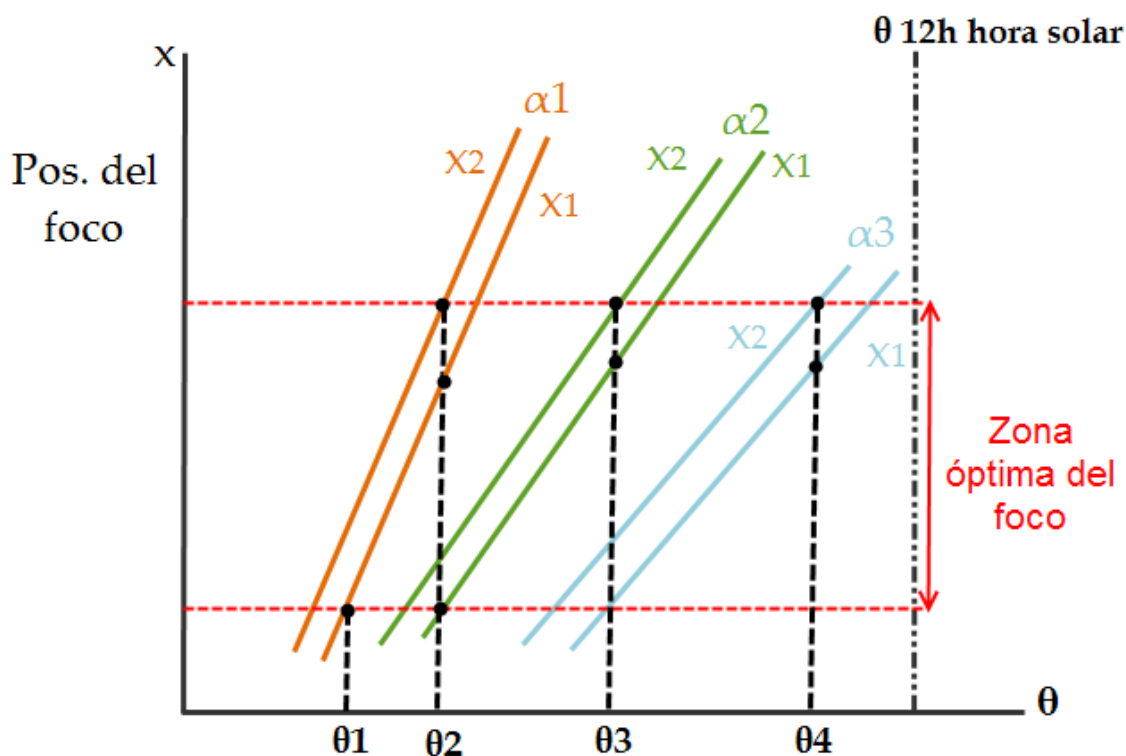


Fig. 4.31. Esquema teórico de la posición del foco en función de la altura solar.

La manera de actuar sobre el ángulo α según el movimiento del sol, cuando el sol se mueve antes de su cenit, es el siguiente.

Comenzando desde la altura solar $\theta1$, hay que colocar el concentrador con un ángulo α tal que la variable $X1$ quede lo más próxima a la zona óptima del foco inferior, en valores inferiores de la variable x de la figura 4.31, es decir, posicionado el foco en la zona del recipiente más cercana al cocinero, con el ángulo $\alpha1$, se mantiene el concentrador con dicho ángulo hasta que el foco se haya desplazado y la variable $X2$ se salga de la zona óptima, el sol ahora se encuentra con un altura solar de $\theta2$, la revisión de la posición del foco debe hacerse cada 15-20 minutos.

Al estar parte del foco fuera de la zona óptima de incidencia, con $\alpha1$ y $\theta2$, hay que recolocar el concentrador volviendo a posicionar el foco en la parte del recipiente trasera, la más cercana a la posición del cocinero, se mueve el ángulo α desde $\alpha1$ a $\alpha2$, volviendo la variable $X1$ a estar en la parte inferior de la zona óptima. De la misma manera habrá que actuar cuando el sol alcance las alturas solares $\theta3$ y $\theta4$.

Cuando el sol haya sobrepasado su cenit habrá que actuar sobre el ángulo de manera inversa, siendo la variable $X1$ la que salga fuera de la zona óptima del foco.

Finalmente, se puede obtener de las gráficas de las figuras 4.24. y 4.29. una aproximación de cual debe ser el ángulo óptimo del panel concentrador en función de la altura solar, ver figura 4.32.

Esta gráfica se ha realizado con los valores recogidos de las medidas tomadas durante los ensayos, realizando más ensayos se puede obtener una tabla completa donde se detalle que ángulo de rotación debe tener el concentrador para que el foco se concentre en la zona óptima, en la parte inferior del recipiente a calentar.

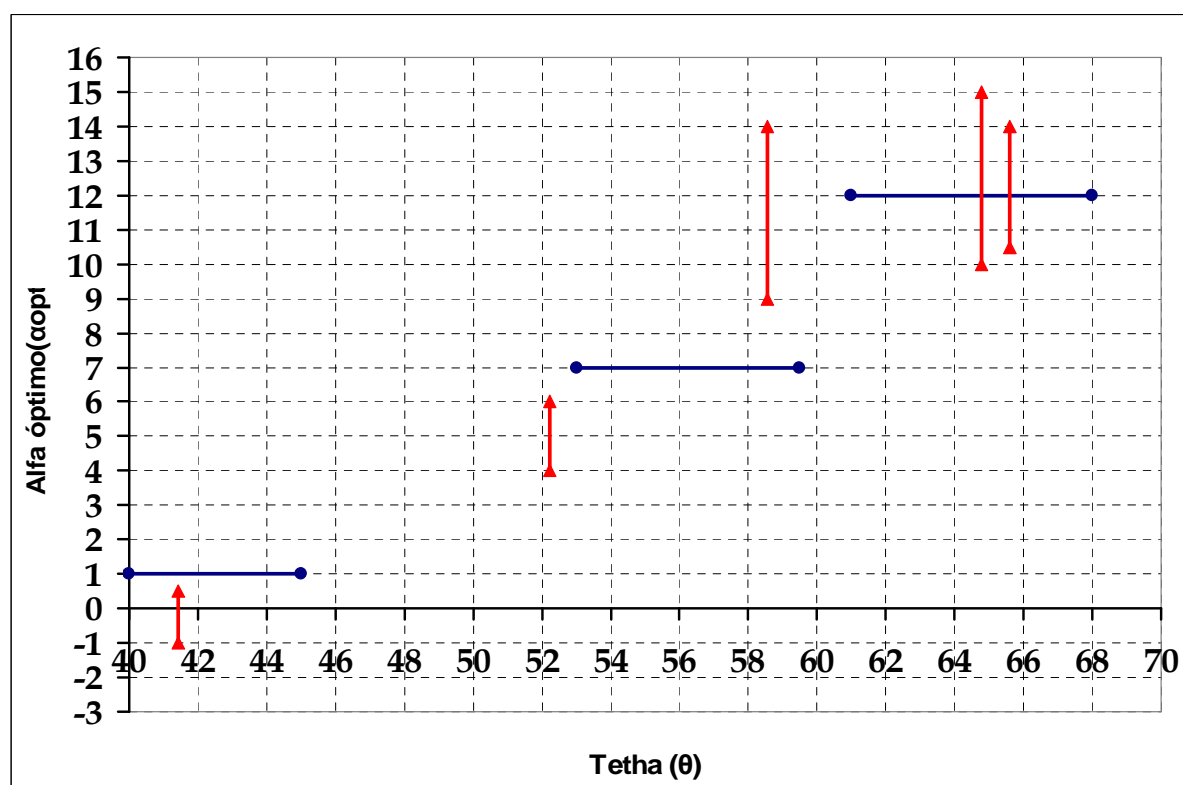


Fig. 4.32. Ángulo de panel óptimo (Alfa) en función de la altura del sol (Tetha). Líneas en rojo: ángulo de panel óptimo para altura solar constante. Líneas en azul: altura solar en la que el panel está correctamente orientado para un ángulo de panel determinado.

Las líneas rojas verticales representan los valores óptimos del ángulo de rotación del panel concentrador para una altura solar concreta, entre estas cotas se sitúan los valores en los que se debe colocar el panel para un mayor rendimiento de la cocina solar.

Las líneas azules horizontales representan el ángulo de rotación de panel óptimo en un intervalo de alturas solares, este ángulo de rotación del concentrador habrá que mantenerlo durante las alturas solares que acotan dicho segmento en la gráfica.

Se puede apreciar que existe una tendencia parecida entre los datos para alturas solares constantes, en rojo, y los datos para ángulos de rotación del panel para diferentes intervalos de alturas solares, en azul. La gráfica de la figura 4.32. está realizada con pocos valores discretos desde una altura solar de 40° hasta una altura solar de unos 68° , cuando se alcanza el cenit solar, en el día que se realizaron los ensayos.

Aun así la tendencia de los dos métodos de medida es apreciable, si se completasen estas gráficas con los valores óptimos para más alturas solares, se obtendría los óptimos del ángulo del concentrador. En la figura 4.33. se ha unido y rellenado los puntos medidos para los dos métodos de recogida de datos: en rojo los valores del ángulo del concentrador tomados con altura solar constante y en azul los valores de dicho ángulo tomados manteniendo el ángulo de panel constante en varios intervalos de alturas solares.

Se puede apreciar que la tendencia es similar, aunque se observan comportamientos no similares a medida que aumenta la altura solar, estos problemas para valores altos de altura solar ya se han comentado en apartados anteriores. Esta coincidencia de resultados sobre los valores óptimos del ángulo del concentrador entre los dos métodos corrobora los resultados.

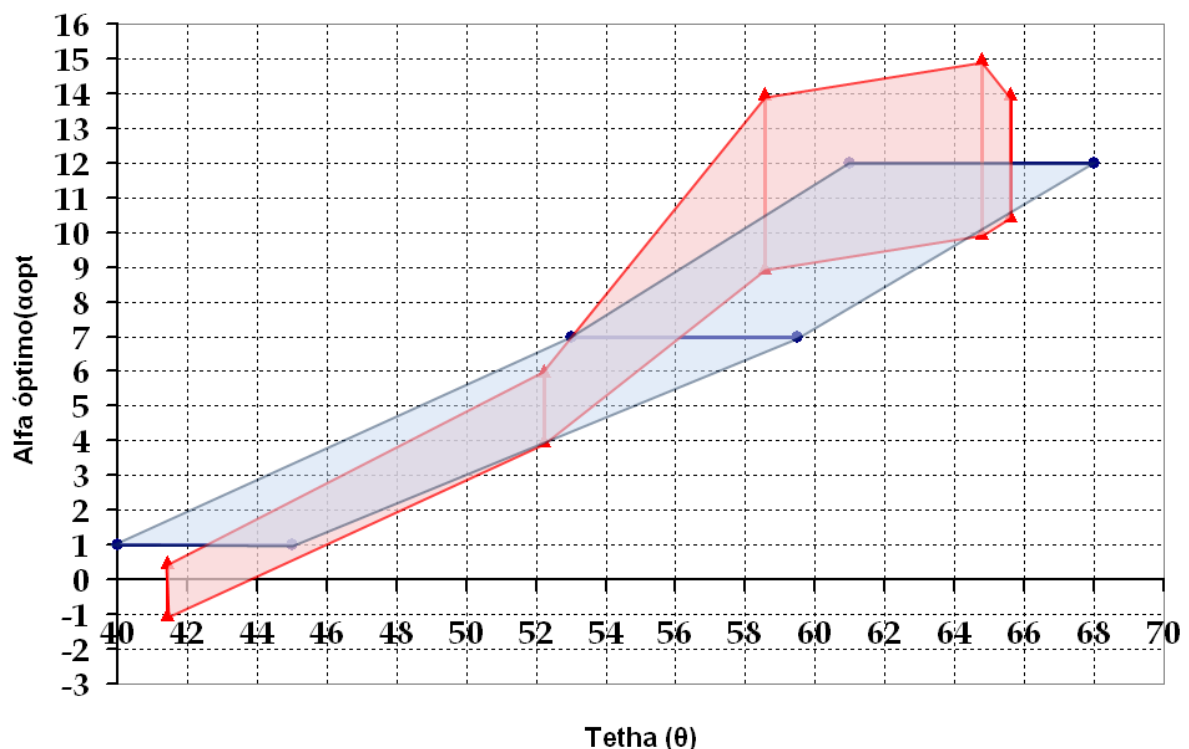


Fig. 4.33. Ángulo de panel óptimo (Alfa) en función de la altura del sol (Tetha). Comparación de los dos métodos de medida.

4.4. Calentamiento de agua en función de la posición del foco

Este experimento trata de poner de relieve la influencia de la zona de incidencia del foco respecto al recipiente donde se calientan los alimentos. Para ello, se han realizado cuatro calentamientos del agua contenida en dicho recipiente y, en función de la radiación incidente, establecer un rendimiento entre la energía necesaria para calentar el agua y la que recibe el concentrador de forma directa.

En el experimento se ha utilizado:

- *Data Logger Testo 175-T3*
- 4 sensores térmicos
- 1 litro de agua

$$C_p = 4.18 \frac{KJ}{KgK}, \rho = 1 \frac{Kg}{l}$$

(Fuente: Duffie & Beckman, 1980)

En las caras internas del recipiente se han instalado los sensores que se conectan al *Data Logger*, por lo que se obtendrán cuatro medidas de temperatura, que corresponden al agua que baña el entorno de la superficie del recipiente. Se calculará la media de estas, que será la temperatura promedio del agua en el recipiente, ver figura 4.34. El recipiente se rellenó con 1 litro de agua a temperatura ambiente al comenzar cada proceso.

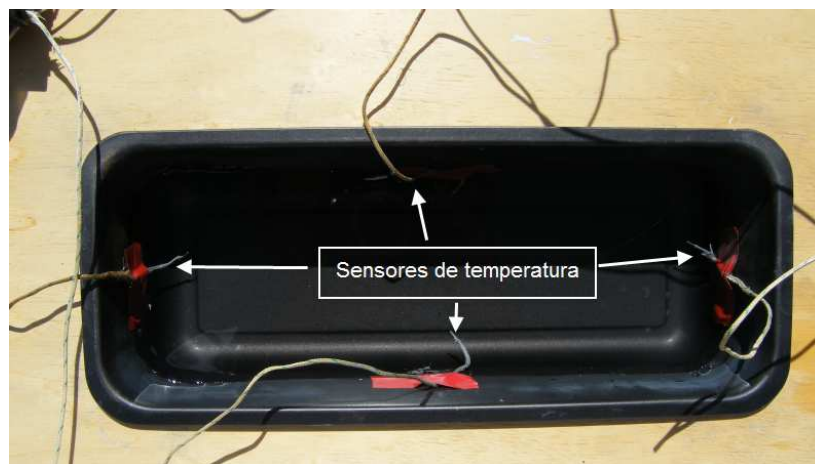


Fig. 4.34. Posición de los sensores de temperatura en el recipiente.

Cada proceso corresponde a una posición del foco sobre el recipiente. En la figura 4.35 se detalla la zona donde se posiciona el foco, las variables $X1$ y $X2$, para cada proceso de calentamiento cada uno datado con un número.

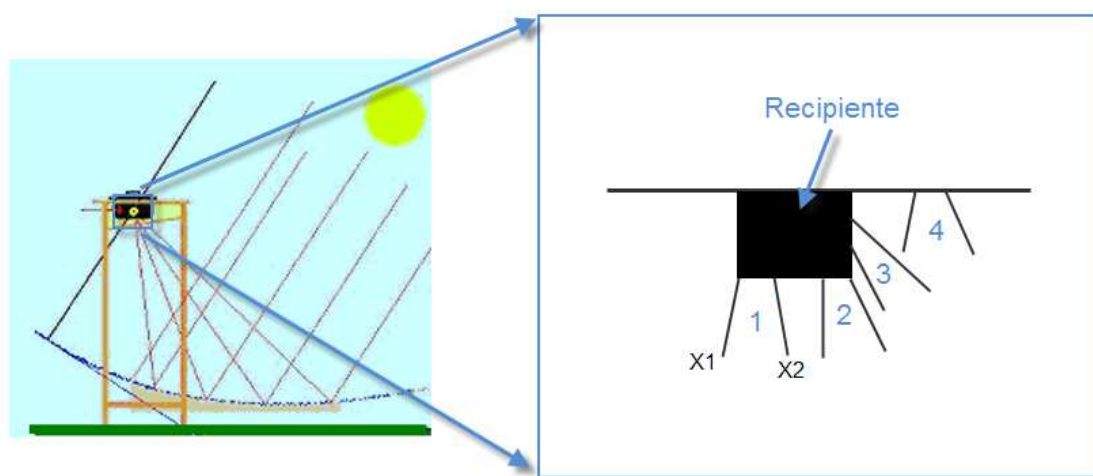


Fig. 4.35. Zonas donde se encuentra el foco para cada proceso

Los procesos de calentamiento duran 20 minutos cada uno. El *Data Logger* recoge datos de temperatura de los cuatro sensores cada minuto.

- **Proceso 1:** el foco se proyecta en la zona 1 de la figura 4.35, en la parte de la base del recipiente más cercana a la posición del cocinero.
 - Ángulo rotación concentrador: $\alpha = 2^\circ$.
 - Medido desde las 10:18h hasta las 10:38h (hora solar). En altura solar desde $\theta = 38.73^\circ$ hasta $\theta = 40.66^\circ$.
- **Proceso 2:** el foco se proyecta en la zona 2, en la parte de la base del recipiente más lejana a la posición del cocinero.
 - Ángulo rotación concentrador: $\alpha = 3^\circ$.
 - Medido desde las 10:47h, hasta las 11:07h (hora solar). En altura solar desde $\theta = 41.42^\circ$ hasta $\theta = 42.80^\circ$.
- **Proceso 3:** El foco se proyecta en la zona 3, en la parte lateral del recipiente.
 - Ángulo rotación concentrador: $\alpha = 3^\circ$.
 - Medido desde las 11:15h hasta las 11:35h (hora solar). En altura solar desde $\theta = 43.25^\circ$ hasta $\theta = 44.05^\circ$.

- **Proceso 4:** El foco se proyecta en la zona 4, en el papel reflectante del invernadero.

- Ángulo rotación concentrador: $\alpha = 1^\circ$.

- Medido desde las 11:41h hasta las 12:01h (hora solar). En altura solar desde $\theta = 44.20^\circ$ hasta $\theta = 44.41^\circ$.

Proceso	α	Hora inicio	Hora fin	θ inicio	θ fin
1	2	10:18h	10:38h	38.73°	40.66°
2	3	10:47h	11:07h	41.42°	42.80°
3	3	11:15h	11:35h	43.25°	44.05°
4	1	11:41h	12:01h	44.20°	44.41°

Tabla 4.5.. Horas y de inicio y fin y su respectiva altura solar.

Los datos de temperatura recogidos por el *Data Logger* para cada proceso se encuentran en los anexos.

Por otro lado, se ha calculado la radiación incidente sobre la llamada superficie proyectada, como ya se describió en el apartado 3.2. Para ello, se ha utilizado la curva de radiación directa diaria sobre plano horizontal para el día en que se realizó el experimento, ver figura 4.36.

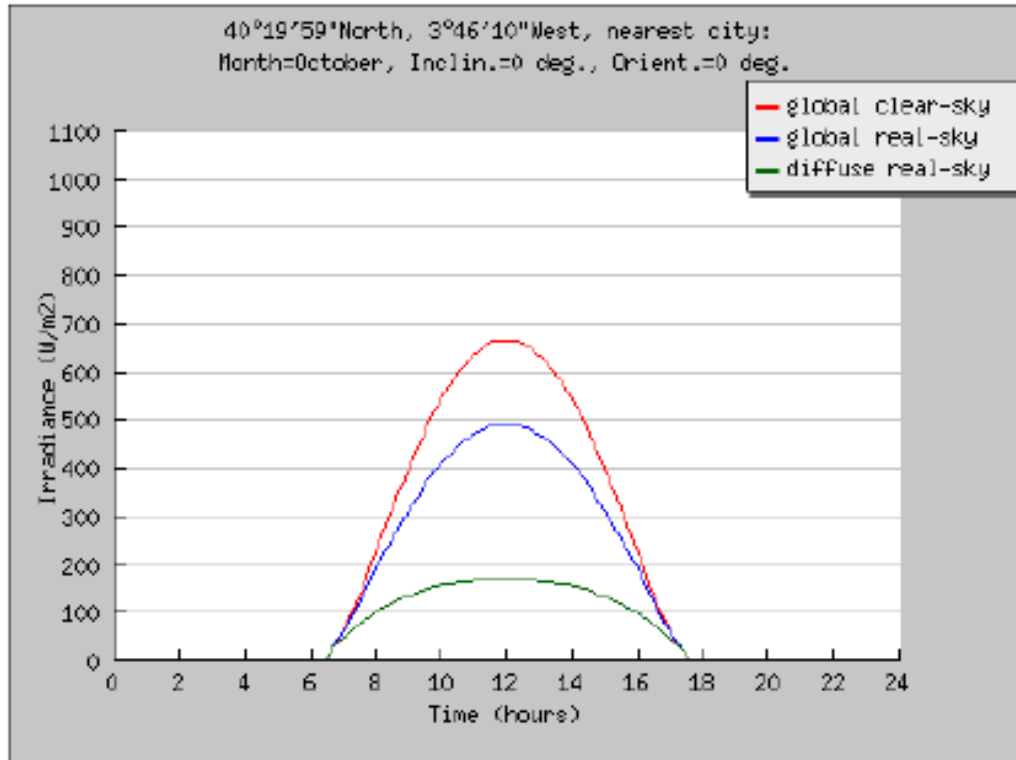


Fig. 4.36. Radiación sobre plano horizontal, para el día 04/10/11 en Leganés. (Fuente: JRC European Commission PVGIS)

Cabe señalar, respecto a la figura 4.36, que la gráfica se ha realizado usando una base de datos de potencia de radiación por metro cuadrado en la horizontal(W/m2) medido cada 15 minutos. Esta tabla de datos puede consultarse en los anexos.

Se ha creado un programa en *Matlab*, *radiación.m*, con el que se calcula la radiación que incide sobre la denominada área proyectada para cada proceso de calentamiento estudiados.

La radiación incidente se calcula para cada minuto, que es el intervalo de tiempo en que se conoce la temperatura del agua del recipiente en el proceso de calentamiento. Para ello, con los datos de radiación incidente sobre plano, medidos cada 15 minutos, se ha calculado la radiación para cada minuto del tiempo que dura cada proceso mediante interpolación entre las dos radiaciones medidas cada 15 minutos.

El ángulo con el que inciden los rayos del sol en el área proyectada, ver figura 3.6, se calcula con el programa *radiación.m* para cada minuto del proceso de calentamiento, según las ecuaciones del apartado 2.2 sobre los ángulos solares. Conociendo estos ángulos se puede calcular el ángulo θ , de la ecuación 15, y aplicando dicha ecuación resulta la radiación incidente sobre el área proyectada para cada minuto en potencia por metro cuadrado.

Para calcular la energía que recibe el área proyectada en cada uno de los procesos, sólo es necesario calcular la integral de la potencia de radiación de cada minuto en los 20 minutos que dura el proceso, ver ecuación 17. En la tabla 4.6. esta energía sobre el área proyectada es Q_r . La superficie del área proyectada se calculó en el apartado 3.3.1.

Esta radiación, idealmente, es la que se concentra en el foco que incide en la cocina, despreciando las pérdidas debidas a efectos ópticos y a la radiación difusa.

Finalmente, se puede calcular la energía que ha necesitado el agua del recipiente para su proceso de calentamiento mediante:

$$E_{\text{calentamiento}}(J) = mC_p\Delta T$$

- m : Masa de agua a calentar. 1Kg.
- C_p : 4.18 KJ/kgk.
- ΔT : Diferencia de temperatura entre el inicio del proceso y el final.

En la tabla 4.6. se muestra el salto de temperatura que se ha producido al final de cada proceso, la energía necesaria para el calentamiento de cada proceso, la

radiación en energía incidente sobre el área proyectada y el rendimiento del calentamiento.

	Δt (min)	ΔT	$mCp\Delta T(J)$	$Qr(J)$	$\eta = \frac{mCp\Delta T}{Qr}$
Proceso 1	20	21,5	89870	189290	0,474774
Proceso 2	20	27,7	115786	204590	0,565942
Proceso 3	20	24,75	103455	216290	0,478316
Proceso 4	20	14,025	58624.5	227490	0,257701

Tabla. 4.6. Energía calentamiento del agua, radiación sobre área proyectada y rendimiento.

Como puede verse en la tabla 4.6., el mayor rendimiento se obtiene cuando el foco se encuentra posicionado en la zona 2, ver figura 4.35. Esto es debido a que es la zona en la que más superficie de la base del recipiente es ocupada por el foco, no sólo por la zona X1-X2 de máxima concentración del foco, sino porque posicionándolo en la zona 2, parte de las zonas Xa-X1 y X2-Xb también incidirán en el recipiente, con lo que aumentará la potencia que recibe el recipiente.

El fabricante recomienda que el foco se comience colocando en la zona 1. A pesar de que térmicamente no es la mejor elección, de esta forma se consigue aumentar en torno al doble el tiempo de tener que chequear la posición del foco, comparado con la situación de posicionar inicialmente el foco en la zona 2.

En cuanto al proceso 3 podemos decir que, aunque el foco no incida en la base del recipiente y lo haga en un lateral, no repercutirá excesivamente en el rendimiento del calentamiento, lo cual permite mayor flexibilidad en cuanto al tiempo que el foco necesita para cambiar su posición, contribuyendo a un cocinado más sencillo y que no necesita de la atención continua del cocinero para un correcto funcionamiento. La incidencia del foco en la zona 3 se verá proporcionalmente más favorecida cuanto más contenido tenga el recipiente en su interior, pues mayor será la altura del contenido y mayor podrá ser la zona 3.

Por último, en cuanto al proceso 4, se puede decir, a tenor del rendimiento obtenido, que se debe evitar que el foco se posicione en zonas cuya incidencia vaya fuera de la superficie del recipiente, ya que la transmisión de calor se verá reducida drásticamente, debido a que la radiación ya no incide directamente si no que lo hace tras sucesivas reflexiones en el papel reflector del cubículo invernadero. Gran parte de esta radiación se invertirá en calentar el aire contenido en el cubículo y a la vez este aire calentará el recipiente, por lo que la transmisión de calor será muy compleja y con grandes pérdidas.

5. CONCLUSIONES Y TRABAJOS FUTUROS.

Este estudio aporta una base para conocer el comportamiento del foco en función de sus variables, además analiza la posición de las diferentes zonas de luminosidad del foco y acota la manera de proceder a posicionar el foco optimizando el calentamiento en la cocción.

Es un análisis en primera aproximación a la radiación que aporta el concentrador ya que el estudio está realizado sobre imágenes fotográficas donde solo se capta el rango visible de la longitud de onda, aun así parece que el comportamiento de la radiación total no va a ser muy distinto del de la radiación visible.

Hay que reseñar que se ha comprobado un comportamiento ineficiente para alturas solares cercanas al cenit, la zona de mayor concentración del foco se difumina y no se forma de manera clara como sucede para otras alturas solares lo que hace difícil su correcto posicionamiento sobre el recipiente, esto indica que la cocina no está optimizada para latitudes tan bajas como las de España.

Futuros trabajos a desarrollar basados en la caracterización del foco son:

- Estudio de pérdidas de calor.
- Determinar rendimiento térmico hasta ebullición.
- Modificaciones estructurales sobre el concentrador a introducir para la correcta incidencia del foco en diferentes latitudes.
- Rendimiento térmico tapando diferentes áreas del espejo.
- Comparación con otras cocinas: solares y de combustión.
- Creación de un prontuario que indique para diferentes latitudes y alturas solares cuál es el ángulo de rotación del panel óptimo.

BIBLIOGRAFÍA

- Smil (2006), p. 12, Archer, Cristina. «*Evaluation of Global Wind Power*». Stanford. Consultado el 03-06-2008. [1]
- «*Energy conversion by photosynthetic organisms*». Food and Agriculture Organization of the United Nations. Consultado el 25-05-2008. [2]
- «*World Consumption of Primary Energy by Energy Type and Selected Country Groups, 1980-2004*». Energy Information Administration. Consultado el 17-05-2008. [3]
- «*World Total Net Electricity Consumption, 1980-2005*». EIA. Consultado el 25-05-2008. [4]
- Apuntes asignatura: ENERGÍAS RENOVABLES: 3º Ing. Industrial. Univ. Carlos III Madrid. [5]
- Apuntes asignatura: NUEVAS FUENTES DE ENERGÍA: 3º Ing. Técnica Industrial. Univ. Carlos III Madrid. [6]
- http://www.ujaen.es/investiga/solar/07cursosolar/home_main_frame/02_radiacion/01_basico/2_radiacion_07.htm. Consultado el 24-10-11. [7]
- Apuntes asignatura: SISTEMAS TÉRMICOS: 4º Ing. Técnica Industrial. Univ. Carlos III Madrid. [8]
- M. Brogen, 2004, Optical Efficiency of Low-Concentrating Solar Energy Systems with Parabolic Reflectors. [9]
- Duffie & Beckman, 1980, Solar Engineering of Thermal Processes. 2ª Edición. [10]
- http://solarcooking.wikia.com/wiki/How_solar_cookers_work Consultado el 30-10-2011. [11]
- Eckholm, Crisis: Firewood. [12]
- <http://www.bioestadistica.uma.es/libro/node22.htm> consultado el 01-11-2011. [13]
- <http://solarcooking.wikia.com/wiki/Primrose>. Consultado el 30-10-2011. [14]
- Valdemar & Zaldivar, Visión por Computador utilizando MatLAB y el Toolbox de Procesamiento Digital de Imágenes. [15]
- Runco, 2011, Apuntes de la asignatura de “Procesamiento de Imágenes Biomédicas” Curso 2011. Dpto. de Física. Universidad Nacional de la Plata. [16]

ANEXOS

Programas en MATLAB

- errorcamara.m
- partesfoco.m
- foco.m
- locX1X2.m
- angsolarcte.m
- angconcte.m
- radiación.m

FOTOS

- Carpeta: Variación altura solar con panel constante
- Carpeta: Variación panel con altura solar constante
- 03_08 12h 95°.JPG, 03_08 13.30h 101°.JPG, 03_08 14h 103°.JPG
- Error1.JPG, Error2.JPG, Error3.JPG
- Pos1bcut.JPG, Pos2bcut.JPG, Pos3bcut.JPG, Pos4bcut.JPG, Pos5bcut.JPG

PDF

- Radiacion oct.pdf